

Titulació:

Grau en Enginyeria Mecànica

Alumne:

Miquel Recasens Fonseca

Enunciat TFG / TFM:

ESTUDI EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓ DE BIGUETES MIXTES DE XAPA DE COMPOSITE (FRP) I FORMIGÓ

Director del TFG:

Ernest Bernat Masó

Convocatòria de lliurament del TFG:

Ordinària. 10 de Juny del 2019

Contingut:

DOCUMENT 1: MEMORIA

Agraïments

Primer de tot, aquests agraïments van dirigits a totes les persones que han contribuït a fer què aquest treball pogués ser realitzat.

A la meua família, per recolzar-me en tots aquest anys d'estudi i confiar en les meves capacitats inclús quan no tenia tan clar cap on dirigir el meu futur acadèmic.

També donar gràcies als professors Ernest Bernat i Lluís Gil per haver fet d'aquest treball tota una experiència dins el camp de la recerca i la investigació. Ha estat un veritable plaer poder haver viscut de primera mà el treball dut a terme dins al laboratori LITEM.

Gràcies al meu director Ernest per la paciència durant les llargues hores de laboratori al llarg del quadrimestre i la confiança depositada en la utilització de les instal·lacions i l'equipament per tirar endavant aquest emocionant estudi.

Finalment, aprecio moltíssim a totes les persones que he conegut al LITEM, saber que tens un equip d'estudiants/investigadors/tècnics tan professionals inspira molt en el teu treball. Finalment et dono les gràcies a tu, lector, per aturar-te un a llegir el resultat del què i ha estat aquesta apassionant experiència.

ÍNDIX DE CONTINGUTS

Abstract

Resum

1	INTRODUCCIÓ	8
1.1	Objectiu:	8
1.2	Abast	8
1.3	Justificació	9
1.4	Estructura del projecte	9
1.5	Diagrama de GANTT	10
2	ESTAT DE L'ART	10
3	Procés de Construcció dels prototips	19
3.1	Materials	19
3.2	Configuració dels prototips	19
3.3	Construcció dels prototips	20
3.3.1	Emmotllat de l'estructura	20
3.3.2	Confecció del reforç de CFRP	21
3.3.3	Adequació i preparació del motlle per la construcció del prototip final ...	24
3.3.4	Fabricació i adequació del reforçament intern del prototip. Incorporació nexes unió CFRP amb formigó.	25
3.3.5	Addició del formigó al motlle	28
3.3.6	Procés de curat del formigó	31
4	Configuració dels assaigs i instrumentació	33
4.1	ASSAIG DE RESISTENCIA A COMPRESSIÓ	33
4.2	ASSAIG DE FLEXIÓ	35
5	Resultats i anàlisi	41
5.1	Primera linealitat	41
5.2	Punt de Trencament	45
5.3	Resultats experimentals obtinguts	50
5.3.1	Cas de Formigó + CFRP + Pedra	50
5.3.2	Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Malla	53
5.3.3	Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Sorra + Malla.	55
5.3.4	Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Sorra + Malla inclinada a 45º	57
5.4	Conclusions dels resultats experimentals	59
6	Pressupost	62
7	Impacte mediambiental	63
8	Conclusions	65
9	Bibliografia	67

ÍNDIX DE FIGURES

Figura 2. Composició per fases del CFRP	11
Figura 3. Teixit de CFRP	12
Figura 4. Estructura de formigó armat.....	13
Figura 5. Exemples de perfils d'acer i la seva unió mitjançant connectors al formigó..	14
Figura 6. Exemple d'estructura mixta. Construcció per a viaducte.	14
Figura 7. Reforç a flexió amb tires de CFRP adherit a bigues de formigó	15
Figura 8. Reforç amb laminat de CFRP adherit a bigues de formigó que treballent a flexió	16
Figura 9. Reforç per confinament a pilars de formigó armat.....	17
Figura 10. Panells prefabricats de compostat GRC	18
Figura 11. Malla de fibra de vidre AR pel reforçament del formigó	18
Figura 12. Neteja del motlle del CFRP	21
Figura 13. Primera capa longitudinal de fibra de carboni + resina epoxi	22
Figura 14. Segona capa transversal de fibra de carboni + resina epoxi	22
Figura 15. Assecament amb contra motlle i pesos per compactar el laminat.	23
Figura 16. Resultat final del reforçament laminat de CFRP.....	23
Figura 17. Adequació de les parets del motlle i del reforç CFRP	24
Figura 18. Col·locació del motlle sobre el reforç CFRP (esquerra) i doble motlle en procés de cementació.....	24
Figura 19. Sagellament de les aristes del motlle amb plastelina	25
Figura 20. Incorporació de pedres al CFRP	26
Figura 21. Incorporació reforçament amb malla recta de fibra de vidre	27
Figura 22. Incorporació del reforçament amb malla de fibra de vidre inclinada 45°	27
Figura 23. Fixament tires de CFRP a la malla de vidre (esquerra) i assecament (dreta)	28
Figura 24. Formigonera i sac de formigó.....	29
Figura 25. Introducció del formigó al motlle.....	29
Figura 26. Motlle subjecte amb sargents per evitar deformacions (adalt) i anivellament del motlle (abaix)	30
Figura 27. Protecció dels prototips amb paper film	31
Figura 28. Resultat final d'un dels prototips, 1.....	32
Figura 29. Resultat final d'un dels prototips, 2.....	32
Figura 30. Secció escleròmetre	34
Figura 31. Escleròmetre amb detall de gràfica d'interpretació de rebot	34
Figura 32. Muntatge complet per l'assaig de flexió.....	38
Figura 33. Elements auxiliars de l'actuador.....	39
Figura 34. Galgues extensiomètriques.....	39
Figura 35. Configuració de canals (CH) per al programa CatMan	40
Figura 36. Desplaçament de l'actuador i força del actuador mostrat en el software del PC connectat al JACK	41
Figura 37. Càlcul del moment d'Inercia	44
Figura 38. Taula propietats mecàniques prototips 3.....	44
Figura 39. Resultant equivalent R_t i Moment en secció de la biga	46
Figura 40. Centroide corresponent a R_t a la nostra secció de biga per Pedra + Malla 1	47
Figura 41. Nova suposició distribució rectangular pel cap de compressió.....	48

ÍNDIX DE GRÀFIQUES

Gràfica 2. Gràfica Moment vs. Desplaçament (Pedra + Malla 2)	41
Gràfica 3. Gràfica comparació de moments reals i teòrics	50
Gràfica 4. Força vs. desplaçament (Pedra)	51
Gràfica 5. Moment vs. tensions (Pedra 1)	52
Gràfica 6. Moment vs. tensions (Pedra 2)	52
Gràfica 7. Força vs. desplaçament (Pedra + Malla 1)	53
Gràfica 8. Moment vs. tensions (Pedra + Malla 1)	54
Gràfica 9. Força vs. desplaçament (Pedra + Malla 2)	54
Gràfica 10. Moment vs. tensions (Pedra + Malla 2)	55
Gràfica 11. Força vs. desplaçament (Pedra + Sorra + Malla)	55
Gràfica 12. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 1)	56
Gràfica 13. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 2)	56
Gràfica 14. Força vs. desplaçament (Pedra + Sorra + Malla 45°)	57
Gràfica 15. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 45° 1)	58
Gràfica 16. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 45° 2)	58
Gràfica 17. Tensions màximes conseguides pels prototips.	59
Gràfica 18. Tensions màximes de tracció i compressió	60

ÍNDIX DE TAULES

Tabla 1. Diagrama de Gantt	10
Tabla 2. Resultats assaig resistència a compressió	35
Tabla 3. Taula equipament i instrumentació assaig de flexió	37
Tabla 4. Taula propietats mecàniques prototips 1	42
Tabla 5. Taula propietats mecàniques prototips 2	43
Tabla 6. Taula error absolut entre les tensions	45
Tabla 7. Procés del càlcul del centroide Xi	47
Tabla 8. Taula propietats mecàniques dels prototips 4	49
Tabla 9. Taula error absolut entre Moment experimental i moment teòric	49
Tabla 10. Pictogrames de perillositat de la resina d'epoxi.	63
Tabla 11. Consum electric al laboratori	64
Tabla 12. Total kg CO2 emesos durant l'exercici	64

Abstract

In this work, the title of which is *Experimental flex resistance study of mixed beams of composite laminate (FRP) and concrete* is intended to carry out a research of an efficient solution constituted by the construction based on mixed materials and an innovative design that presents a real advantage respect currently models used in engineering applied to construction.

This is a study project on the feasibility of the construction, as well as the compatibility of the different materials used, with the mechanical performances presented by this proposed solution. The mechanical test of the specimens is carried out with 4 prototypes of different composition, with which we want to study which structure formed by mixed materials is the best front to mechanical flexing efforts.

Resum

En aquest treball, el títol del qual és *Estudi experimental de la resistència a flexió de biguetes mixtes de xapa de composite (FRP) i formigó* es pretén fer una investigació en busca d'una solució eficient constituïda per la construcció a base de materials mixtos i un disseny innovador que presenti una avantatge real respecte als models utilitzats actualment en l'enginyeria aplicada a la construcció.

Es tracta d'un estudi on es vol comprovar tan la viabilitat constructiva, així com la compatibilitat dels diferents materials emprats, com les prestacions mecàniques que presenta aquesta solució proposada. L'assaig mecànic dels espècimens es durà a terme amb 4 prototips de composició diversa, amb els quals es vol estudiar quina estructura formada per materials mixtes es comporta millor front a esforços mecànics de flexió.

1 INTRODUCCIÓ

En aquest apartat definirem l'objectiu del projecte, l'abast i la justificació de la seva importància. A més s'explicarà breument l'estructura dels documents.

1.1 Objectiu:

L'objectiu d'aquest treball es fer un estudi experimental sobre el comportament a flexió de biguetes conformades a base de materials compostos. Per aconseguir-ho es pretén aconseguir una sèrie de reptes que conformaran l'abast del nostre estudi

- Elaboració d'un disseny i construcció d'un prototip a base de materials compostos. Entre ells es vol treballar la interacció de les fibra de carboni reforçada amb resina i formigó.
- Comprovar la viabilitat constructiva del model proposat. Si la compatibilitat de materials tan diferents entre ells fa possible obtenir un model de prototip apte per superar els assajos mecànics a flexió que engloba aquest estudi.
- Càlculs teòrics de les propietats mecàniques dels espècimens a assajar basats en normativa vigent d'estructures mixtes.
- Preparació de l'equipament necessari i programació dels contingents necessaris per dur a terme els assaigs destructius per flexió al Laboratori.
- Recollida i tractament de dades experimentals per elaborar un estudi analític dels resultats obtinguts.

En definitiva, es vol trobar una solució constructiva a un prototip estructural constituït per materials mixtes diversos tals com; formigó, laminat de fibra de carboni (CFRP), malla de fibra de vidre, sorra i grava. Es vol fer un estudi amb diversos prototips per tal d'esbrinar quin d'ells presenta millors prestacions mecàniques, en relació al comportament conjunt estructural a flexió, la compatibilitat dels materials utilitzats així com la viabilitat constructiva.

1.2 Abast

L'abast d'aquest treball inclou els següents punts:

- ✓ Caracterització dels materials a utilitzar per la construcció.
- ✓ Caracterització de la configuració dels prototips a estudiar.
- ✓ Protocol seguit en el durant el procés construcció dels prototips.
- ✓ Protocol seguit per al muntatge de l'equipament i la instrumentació utilitzada durant el desenvolupament dels assajos.
- ✓ L'avaluació dels resultats obtinguts de cada assaig i la validesa dels mateixos.

- ✓ L'anàlisi i tractament de les dades obtingudes, comprovant la coherència segons la normativa vigent referent a estructures mixtes.
- ✓ L'estudi del cost associat al present estudi experimental.
- ✓ L'estudi d'impacte ambiental.

Aquest treball no inclou els següents aspectes:

- ✗ Simulació per mètode d'elements finits (FEA).
- ✗ Protocol del tractament de residus.

1.3 Justificació

Ens els darrers anys s'ha anat introduint cada cop més la utilització d'estructures basades en una composició mixta o materials compostos. La demanda de materials amb altes prestacions mecàniques per aplicacions molt específiques fa que cada cop hi hagi una especialització més gran en aquest camp d'investigació.

La fisonomia i comportament d'aquestes estructures sol ser el resultat de la combinació de les propietats mecàniques d'ambdós materials, creant una sola estructura capaç de suplir les limitacions que presentava individualment algun dels dos materials base. La implementació d'aquests materials compostos fa possible l'aplicació d'aquestes estructures mixtes en solucions constructives molt diverses, on les exigències mecàniques son molt altes.

Amb aquest estudi es pretén investigar les possibilitats constructives i mecàniques de la combinació de materials tan diversos com formigó, laminat de fibra de carboni (CFRP), malla de fibra de vidre, sorra i grava. Es pretén trobar una solució estructural que permeti a un material fràgil com el formigó, treballar conjuntament amb els materials anteriorment mencionats per tal d'implementar una configuració conjunta molt dúctil capaç d'assolir un comportament a flexió òptim.

1.4 Estructura del projecte

El projecte consta de tres documents separats:

- La present memòria. Engloba tot l'estudi, on es recopilen les metodologies finals, l'anàlisi de resultats i les conclusions que s'extreu.
- Al document Pressupost consta el preu aproximat dels serveis i materials emprats en la realització d'aquest estudi.
- L'Annex és el document on es trobar el seguiment individualitzat de cada prototip assajat en el laboratori i les seves històriques.

1.5 Diagrama de GANTT

Per tal de seguir un planning organitzat de les moltes tasques a realitzar en aquest estudi experimental tant dins com a fora del laboratori, s'ha efectuat una diagrama de Gantt de les diferents setmanes des del començament del quadrimestre de primavera fins a l'entrega final del informe el 10 de Juny. En el següent diagrama es pot observar la repartició de les diverses tasques realitzades en aquest estudi experimental:

	Febrer			Març				Abril				Maig				Juny	
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Construcció Prototips																	
Període de fraguat formigó																	
Assaigs flexió																	
Redactat informe final																	
Lliurament informe final																	

Tabla 1. Diagrama de Gantt

2 ESTAT DE L'ART

En aquest present estudi de flexió de biguetes a base de materials mixtes ens centrarem en el comportament conjunt estructural, sense deixar de costat el perquè de l'elecció del cada un dels materials que hem escollit al laboratori per fabricar els nostres prototips així com les seves propietats mecàniques individuals i com aquestes afectaran al conjunt de l'estructura proposada. Per tant, en aquesta primera fase d'estudi de l'art farem una recerca i caracterització dels materials que formaran part en aquest experiment.

Els materials utilitzats per aquest estudi els podrem distingir en dos subgrups. Materials compostos i estructures mixtes a base de materials compostos i reforçaments. En el cas d'aquest segon grup es centrarà més la informació en l'aplicació i desenvolupament d'aquest materials en el comportament estructural.

Materials compostos:

- *Polímer reforçat amb fibra de carboni (CFRP)*

El polímer reforçat amb fibra de carboni o CFRP en les seves sigles en anglès és un material compost format per dues fases: una matriu de fibra de carboni i un reforçament a base de epoxi (o altres resines com polièster, vinil, etc.), formant així un compost en forma de làmines el qual es caracteritza per ser molt fort, lleuger i costós (30-50€/m²). Es presenta com un compost amb una mescla òptima en relació pes-força, durabilitat i resistència extrema a la corrosió. Per això els seus camps d'aplicació més comuns que requereixen aquest tipus d'altres prestacions son la indústria aeroespacial, l'automoció, la competició esportiva (embarcacions, bicicletes, motocicletes, etc.) l'indústria armamentística i l'enginyeria civil, sector d'aplicació en el que ens centrarem en aquest estudi. [1]

El material compost CFRP ve en forma de laminats en els que ja s'incorporen les fibres com element resistent y la seva matriu de resina. Normalment tenen un espessor d'entre 1,2 i 1,4 mm i es presenten en rotlles d'entre 100 i 500 m en quantitats industrials, els quals després es tallen en les dimensions desitjades.

Aquest polímer reforçat està format per dues fases les quals constitueixen un compost. Un compost es defineix com una substància en la qual dos o més elements s'uneixen per formar un sol material que consta d'almenys dos components químicament diferents, amb propietats resultants significativament diferents a les dels elements individuals. En escala microscòpica, un compost té dues o més fases semblants separades per una interfície diferent. Aquesta interfície té gran influència sobre les propietats de la composició.

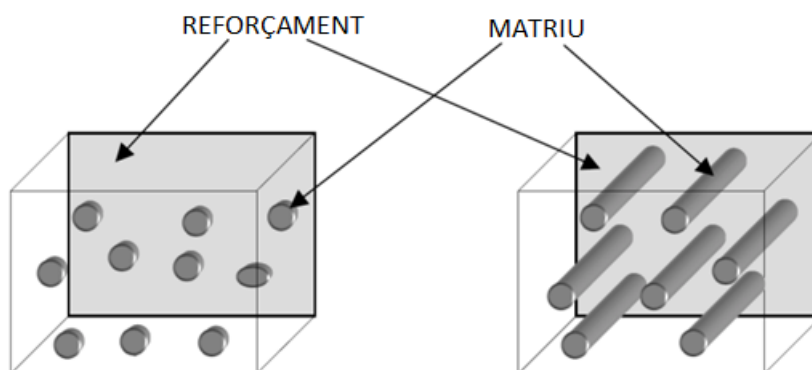


Figura 1. Composició per fases del CFRP

1ª Fase: Matriu: La primera fase és contínua i es coneix com a matriu. En general, les característiques de la matriu es milloren en gran mesura a través de la incorporació d'un altre constituent que origina un material combinat. Aquest compost pot contenir ceràmica, metall o una matriu de polímer com és el nostre cas.

2ª Fase: Reforçament: La segona és la denominada reforç, ja que es millora les propietats de la matriu, i en la majoria dels casos, aquest reforç ofereix més rigidesa, enforteix i endureix la matriu. El reforçament bàsicament es compon de fibra de carboni.

La fibra de carboni es el reforçament que s'utilitzarà per a l'elaboració dels nostre compost CFRP. Una fibra de carboni és un fil llarg i fi de material d'entre 0,005-0,010 mm de diàmetre i format principalment per àtoms de carboni. Els àtoms de carboni s'uneixen en cristalls microscòpics que estan majorment alineats paral·lelament a l'eix llarg de la fibra. L'alineació de cristall fa que la fibra sigui significativament forta per la seva grandària. Unes 1000 fibres de carboni es retorcen per formar un fil, el qual pot ser usat individualment o ser teixit en formant una tela o malla.

El material compost CFRP ve en forma de laminats en els que ja s'incorporen les fibres com element resistent y la seva matriu de resina. Normalment tenen un espessor d'entre 1,2 i 1,4 mm i es presenten en rotlles d'entre 100 i 500 m en quantitats industrials, els quals després es tallen en les dimensions desitjades.

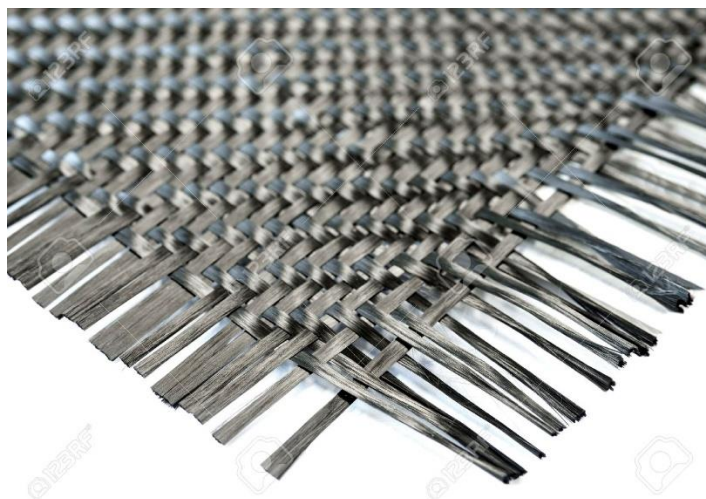


Figura 2. Teixit de CFRP

Durant la dècada de 1970, els treballs experimentals per trobar matèries primeres alternatives van conduir a la introducció de fibres de carboni a partir d'una massa de petroli derivada del processament del petroli. Aquestes fibres contenen aproximadament 85% de carboni i tenien una excel·lent resistència a la flexió. Malauradament, només tenien una força de compressió limitada i no eren àmpliament acceptats.

Actualment, les fibres de carboni són una part important de molts productes, i cada any es desenvolupen noves aplicacions. Els Estats Units, Japó i Europa Occidental són els principals productors de fibres de carboni. [2]

- *Formigó*

El formigó és un material compost que sol ser emprat en la construcció de tot tipus d'estructures i està format per un tipus d'aglomerat: ciment de tipus Portland barrejat amb aigua. A aquesta combinació també cal afegir-li diversos agregats com, per exemple, grava i sorra, a més d'altres additius específics. El ciment és un material pulverulent que per si mateix no és aglomerant i que, barrejat amb aigua, s'hidrata i es converteix en una pasta modelable amb propietats adherents, que en poques hores fraga i s'endureix, tornant-se en un material de consistència pètria.

Per aconseguir que aquesta barreja sigui perfecta calen fer servir diverses eines. La fonamental és un mesclador, o també anomenat formigonera. Aquests aparells s'encarreguen de remoure i fer girar els materials que donaran lloc al formigó, per a això es requereix un temps mínim de tres minuts. L'aigua de pastat intervé en les reaccions d'hidratació del ciment. La quantitat de la mateixa ha de ser l'estrictament necessària marcada pel fabricant, ja que la sobrant que no intervé en la hidratació del ciment s'evaporarà i crearà buits en el formigó disminuint la resistència del mateix.

La principal característica estructural del formigó és que resisteix molt bé els esforços de compressió, però no té bon comportament enfront d'altres tipus d'esforços (tracció, flexió, tallant, etc.), i per aquest motiu és habitual implementar-lo amb reforços com armadures de acer, rebent en aquest cas la denominació de formigó armat. Aquest conjunt es comporta molt favorablement davant les diverses sol·licitacions o esforços esmentats anteriorment. [3][4]



Figura 3. Estructura de formigó armat

L'estructura mixta que es vol treballar en aquest estudi experimental pretén assimilar el comportament estructural que aconsegueix aquest formigó armat, però amb el conformat dels reforços a base de fibra de carboni i malla de fibra de vidre. Per tant, en el següent apartat de l'estat de l'art es comentaran les principals estructures mixtes utilitzades avui en dia en construcció. [5]

- *Estructures mixtes: Formigó i reforçament amb Acer.*

Una construcció mixta es caracteritza essencialment per la presentació en la seva estructura resistent de peces que posseeixin seccions mixtes, és a dir, seccions resistents a les quals l'acer estructural i el formigó treballen solidàriament; conjuntament amb aquests elements bàsics poden col·laborar diferents tipus de materials.

Aquests materials, encara que essencialment diferents, són totalment compatibles i complementaris entre si; tenen gairebé la mateixa dilatació tèrmica; tenen una combinació de resistència ideal, ja que el formigó és eficaç a compressió mentre que l'acer ho és a tracció. A més, el formigó proporciona protecció contra la corrosió i aïllament tèrmic a l'acer a temperatures elevades i pot protegir les seccions primes d'acer contra bonys i vinclament lateral per torsió [6].

Una peça mixta està composta bàsicament per tres elements estructurals diferenciats:

1. La secció del formigó
2. La secció metàl·lica
3. Els connectors

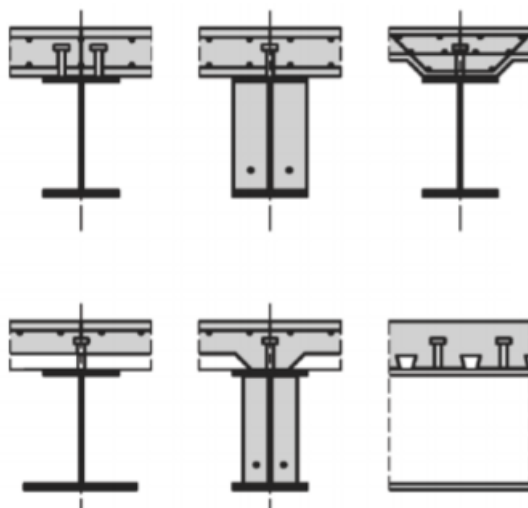


Figura 4. Exemples de perfils d'acer i la seva unió mitjançant connectors al formigó.

Com el formigó treballa conjuntament amb l'acer, a més de funcionar com a distribuïdor de càrregues, està sotmès a possibles deformacions per l'acció de certs elements inclosos en el formigó i solidaris amb les peces metàl·liques. La missió d'aquests elements anomenats connectors és evitar o controlar els lliscaments relatius de tots dos materials. Així, el formigó col·labora a la zona comprimida augmentant la resistència del conjunt.



Figura 5. Exemple d'estructura mixta. Construcció per a viaducte.

On més s'aprofita l'estructura mixta es precisament en el nostre camp d'investigació en aquest present treball; en flexió. En els casos de barres a flexió es produeix una doble sol·licitació de compressió i tracció, favorable a les propietats dels materials bàsics, i en apropiat paral·lelisme amb les condicions d'ús de les construccions. És important també l'ocupació en aquests casos del formigó en zones de treball a tracció de les peces mixtes, ja que pot ser apte com a suport físic d'armadures incorporades en el mateix formigó, contribuint a la millora en les condicions d'estabilitat, inèrcia o funcionalitat de les seccions d'acer estructural. [7]

- Estructures mixtes: Formigó i reforçament amb fibra de carboni.

Alguns dels problemes que presenta el formigó tradicional es poden reduir mitjançant la incorporació de fibres. La addició d'aquestes fibres a la resta de components del formigó

distribuïdes uniformement, proporcionen un material més homogeni, amb una resistència a tracció superior, menys retracció i major tenacitat al impacte. [10]

La matriu de formigó serveix per mantenir el material unit, aportant resistència a compressió, rigidesa i protecció a les fibres. A més a més, en estat fresc son molt modelables i es poden aconseguir formes més complexes que siguin requerides per la geometria de l'estructura. Per altra banda, la fibra de carboni suporta esforços de tracció per adherència al formigó, controlant la seva fissuració, reduint-la i millorant la tenacitat. El compost de CFRP te les següents aplicacions coma reforçament:

Reforç a Flexió

Pel reforç a flexió de bigues, biguetes, forjats y altres elements de formigó y formigó armat s'utilitza, principalment, el mètode d'enganxat de laminats rectes. En algun cas també es pot utilitzar el mètode d'enganxat dels teixits. L'adhesiu en forma de resina serveix per transmetre l'esforç tallant entre el reforç i el formigó.

Aquest tipus de reforç no s'utilitza com armadura de compressió. L'element de reforç es molt esvelt i la possibilitat de vinclament d'aquest es molt gran. En experiències en aplicació en camps de construcció s'ha observat que amb irregularitats del suport bastant petites s'ha arribat a produir aquest fenomen de inestabilitat, arribant inclús a l'arrencament per part del suport de formigó. [9][11]



Figura 6. Reforç a flexió amb tires de CFRP adherit a bigues de formigó



Figura 7. Reforç amb laminat de CFRP adherit a bigues de formigó que treballant a flexió

Reforç per confinament

Aquesta es una aplicació molt adient per elements sotmesos a compressió simple o composta, en els que es pot incorporar un reforç per confinament. Aquest tipus de reforç es fa principalment en pilars. El sistema utilitzat es el de teixits, degut a la fàcil adaptabilitat a qualsevol forma del suport.

En aquest casos el teixit envolta la peça a reforçar completament, de dalt a baix. S'afegeixen tantes capes de teixit com la demanda mecànica de l'estructura exigeixi. Aquest embolcall provoca un confinament de la peça que fa millorar el seu comportament front càrregues. Principalment, aquestes càrregues problemàtiques son fruit del comportament del pilar a compressió, on inicialment s'escurça i per efecte *Poisson* es dilata transversalment. El reforç per confinament es controlar aquesta dilatació transversal, millorant així la capacitat portant.



Figura 8. Reforç per confinament a pilars de formigó armat

Reforç a tallant

Pel reforç de peces a tallant el que es fa es col·locar les fibres de carboni a mode de estreps adherits amb resina d'epoxi. Aquest tipus de reforç consisteix en embolicar o cobrir transversalment l'element a reforçar.

Reforçament a murs

Per últim, un dels reforços menys usats és el de murs, tant emparedats de totxos com de formigó. Aquest murs estan sotmesos a esforços longitudinals (càrregues sísmiques, de vent, etc.) com verticals (càrregues gravitatòries). Amb el sistema d'enganxat de teixits als murs en forma de creu s'arriba a millorar la capacitat portant dels murs envers qualsevol de les càrregues indicades anteriorment. [11]

- *Estructures mixtes: Formigó i reforçament amb fibra de vidre.*

En el cas de reforçament del formigó amb fibra de vidre s'han obtingut bons resultats de treball quan es tracta de morter, utilitzant-se en diferents aplicacions tals com: panells amortidors de soroll, panells prefabricats de façanes utilitzats en edificació degut a la seva fàcil col·locació y lleugeresa. El material utilitzat per a la fabricació d'aquest tipus de panells es conegut com GRC (Glass Reinforced Concrete).

El GRC té com a característiques fonamentals una bona combinació d'altres resistències a tracció i compressió, a més a més d'una bona cohesió, un bon mecanisme de trencament i una bona resistència al impacte. [12]

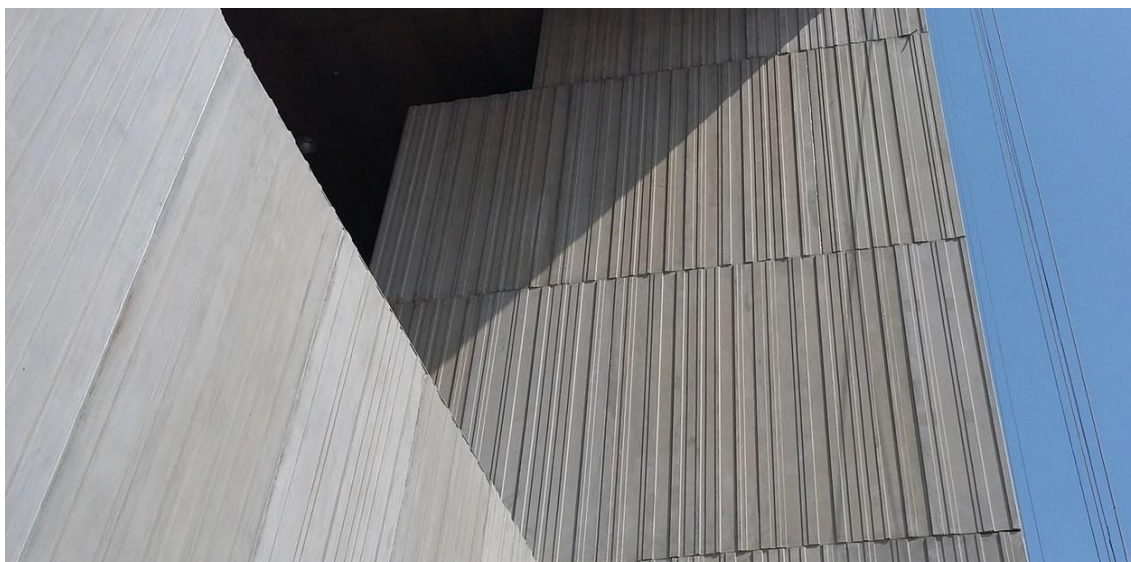


Figura 9. Panells prefabricats de compostat GRC

Les fibres de vidre utilitzades pel reforçament del formigó són del tipus àlcali-resistents AR, d'aquesta forma s'evita la formació del gel àlcali-silicat el qual provoca efectes negatius en la durabilitat de la fibra i per tant en l'afebliment del reforç en la estructura homogènia i un deteriorament prematur d'aquesta.



Figura 10. Malla de fibra de vidre AR pel reforçament del formigó

3 Procés de Construcció dels prototips

3.1 Materials

Els materials dels quals estan formats el prototips que s'han desenvolupat durant aquest procés de construcció son els següents:

- Fibra de carboni, *MasterBrace FIB 300/50 CFS*
Laminat de fibra de carboni unidireccional de molt alta resistència.
- Resina Epoxi, *Resoltech 1200*
Sistema de resina epoxi d'última generació per l'elaboració de laminats, formulat sense diluents reactius.
- Enduridor epoxi, *Resoltech 1204*
Mesclat amb la resina d'epoxi actua com agent catalitzador o enduridor en l'elaboració del laminat CFRP.
- Pedra, Grava 5/12 *Sorigue*
Grava artificial neta, sense gra fi.
- Sorra, sorra estàndard (0-4 mm) *Mausa*
Mescla de compostos de Sorra neta.
- Malla de fibra de vidre, *Mapegrid G220*
Malla de fibra de vidre resistent als àlcalis, pre-aprestada, per al reforçament estructural d'armat.
- Formigó, Formigó sec *Fiasa HS-25*
Mescla homogènia de àrids, cement i additius en sec.

3.2 Configuració dels prototips

En aquest treball es volen estudiar 4 espècimens de diferent composició amb els quals es vol valorar experimentalment quin presentaran un millor comportament front a esforços de flexió. Els 4 prototips proposats a estudiar mecànicament i demostrar la seva viabilitat constructiva son:

- 1) Estructura amb **CFRP + Pedra + Formigó.**
- 2) Estructura amb **CFRP + Pedra + Malla + Formigó.**
- 3) Estructura amb **CFRP + Pedra + Sorra + Malla + Formigó.**
- 4) Estructura amb **CFRP + Pedra + Sorra + Malla inclinada (45º) + Formigó.**

Per a cada prototip ha estudiar hem volgut efectuar dos exemplars. Per un costat assegurem que el procés constructiu s'efectua dos cops i així si toca descartar algun exemplar per defectuós o perquè presenta un aspecte no adequat per al seu posterior assaig, es pot efectuar l'assaig amb l'altre prototip. Per altra banda també es molt útil a l'hora de comparar resultats obtinguts, ja que el procés constructiu es molt semblant a tots els espècimens, es suposa que conforme anem conformant els prototips anirem adquirint experiència tan en el procediment com en el que s'ha de fer i el que no segons

assaig i error. Afegint la dificultat logística de que s'han produït a una escala força fidel a l'aplicació real d'aquest tipus de d'estructura per tal de facilitar l'adquisició de dades i aproximar-lo al màxim al seu comportament mecànic real.

3.3 Construcció dels prototips

En aquesta part de treball pràctic en el laboratori, s'han realitzat el que seran els nostres prototips definitius basats en el dissenys inicials proposats, per tal de poder testar-lo en condicions mecàniques reals i determinar la viabilitat d'aquest nous dissenys implementats.

Material utilitzats:

- Motlle d'alumini amb disseny *omega shape*.
- Fibra de carboni.
- Tisores/*cutter*.
- *Pinzells*.
- Silicona i pistola d'aplicació.
- Alcohol Metanol 95%.
- Acetona.
- Netejador multi ús.
- Resina d'epoxy.
- Catalitzador.
- Bàscula.
- Paper de cuina.
- Paper Film.

3.3.1 Emmotllat de l'estructura

Inicialment hem adequat el motlle d'alumini prefabricat amb el disseny en forma d'omega per a la nostra capa de carboni reforçadora estructural. Hem seleccionat la secció desitjada que utilitzarem per a la fabricació del nostre prototip, aproximadament de 2x0,5 m de superfície. Posteriorment s'ha procedit a la neteja en profunditat del motlle per tal d'evitar la presència de qualsevol brutícia, impuresa o agent estrany en la modelització del prototip.

Per tal d'adequar el motlle hem establert tres fases de neteja amb 3 productes diferents. Primer hem netejat en profunditat en una primera fase amb Alcohol-Metanol 95% per tal de fer una neteja superficial però no en profunditat. Seguidament hem aplicat una capa de Acetona sobre el motlle per tal d'elaborar una camisa totalment llisa i recobrir qualsevol desperfecte en forma fruit de la mecanització en l'elaboració del motlle. Finalment després d'haver esperat el temps necessari d'assecatment de la camisa de acetona aplicada, hem acabat de polir la superfície amb un producte de neteja universal multi ús per emportar-se la resta de Acetona sobrant que no ha sigut adherida per l'estructura.

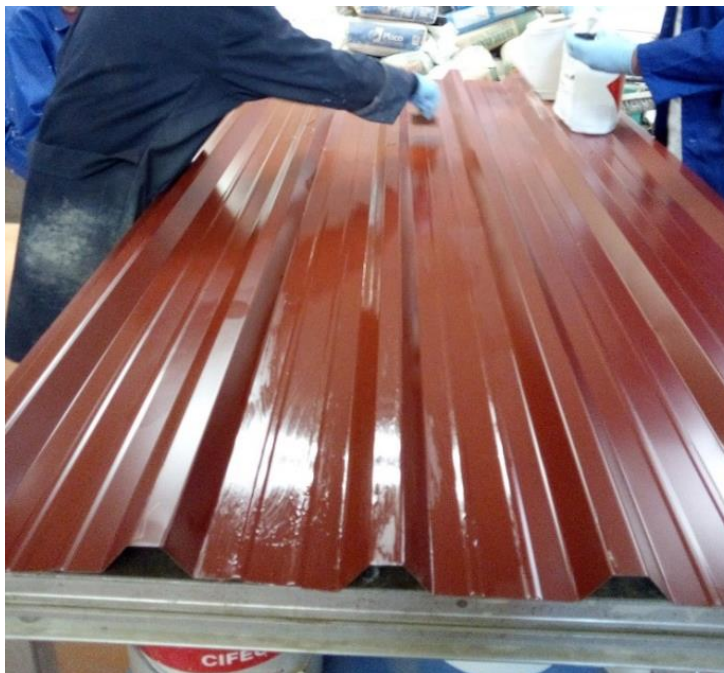


Figura 11. Neteja del motlle del CFRP

3.3.2 Confecció del reforç de CFRP

El segon pas ha estat la construcció del reforç de CFRP sobre el motlle prèviament preparat. Per aquesta confecció s'han seguit les proporcions per la confecció de materials compostos de CFRP, on s'ha utilitzat un 50% de fibra i una 50% de resina i catalitzador. Primer de tot s'ha pesat la quantitat de CFRP a utilitzar a la bàscula i després s'ha fet la preparació de la barreja de resina d'Epoxi + catalitzador equivalent en proporció.

El prototip final ha estat confeccionat en 3 capes:

1. Primera capa longitudinal a l'estructura: formada per 2 seccions de retall de fibra de 2x0,5 m solapades uns 10 cm.
2. Segona capa transversal: formada per 4 seccions de retalls de fibres amb una col·locació de 90° respecte l'eix longitudinal de la primera capa.
3. Tercera capa longitudinal: formada per 2 seccions de retall de fibra de 2x0,5 m solapades uns 10 cm.

S'ha pesat l'equivalent a cada capa de CFRP i s'ha elaborat la barreja de resina d'Epoxi i catalitzador seguint les següents proporcions, on la confecció per cada capa representa el 50% de cada material:

- 1 capa CFRP = 385,2 g
- Preparació Resina + catalitzador a proporció **5/1,750** (marcat pel fabricant)
 - Resina Epoxi = 285,3 g
 - Catalitzador = 99,8 g

Primerament s'ha disposat una capa de la barreja de resina sobre el motlle per tal crear la primera capa d'impregnació per a la part posterior de la 1a secció longitudinal de CFRP. Després s'ha col·locat la secció continua longitudinalment i s'ha procedit a

adherir tota la barreja de resina restant a la secció anterior conforme s'ha donat forma d'*omega* a la capa de fibra gràcies al motlle.

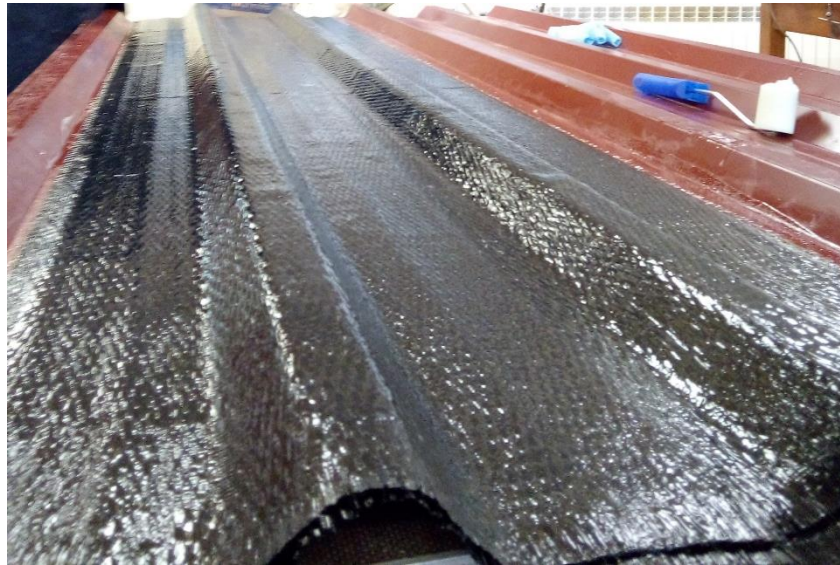


Figura 12. Primera capa longitudinal de fibra de carboni + resina epoxi

Seguidament hem fet la mateixa preparació de resina d'Epoxi i catalitzador per confeccionar la 2a capa de CFRP. La diferencia en aquest cas ha estat que hem disposat aquesta 2a capa de forma transversal al motlle i en seccions. Amb aquesta composició es vol dotar a l'estructura d'una major resistència mecànica, trencant una sola linealitat de fibres i fer un reforç amb una fisonomia semblant a un mallat. Aquesta construcció es pretén que distribueixi les tensions sofertes per l'assaig a flexió d'una forma més òptima.

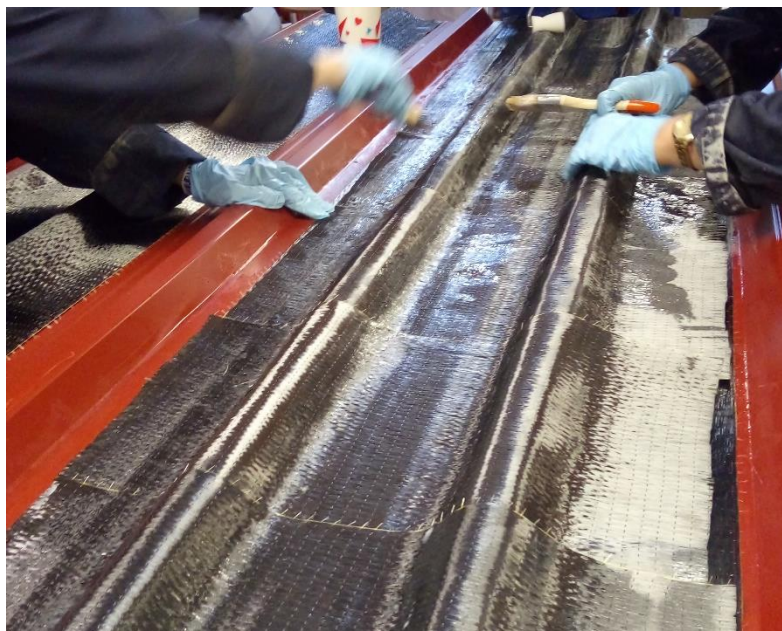


Figura 13. Segona capa transversal de fibra de carboni + resina epoxi

Finalment, la tercera capa de CFRP s'ha col·locat altre vegada transversalment al motlle per tal de finalitzar aquesta construcció en forma de Sandwich, alternant geomètricament la disposició de les fibres en 90° i dotant així al reforç estructural d'un

extres de resistència i rigidesa davant efectes mecànics com el vinclament. S'ha aplicat el mateix percentatge de fibra i resina que en les dues capes anteriors.

Un cop s'ha deixat assecar uns minuts, hem recobert amb una capa de paper de cuina tota la superfície estructural del motlle, per tal de donar una protecció en forma de recobriment a l'hora de col·locar el contra motlle a la part superior. Col·locada la part de dalt del motlle sobre l'estructura, hem distribuït una sèrie de pesos sobre aquest conjunt per tal d'uniformar la pressió a repartir durant el procés d'assecatge que durarà unes 48. El resultat obtingut després de 2 dies d'assecament ha estat el que s'observa a continuació.



Figura 14. Assecament amb contra motlle i pesos per compactar el laminat.



Figura 15. Resultat final del reforçament laminat de CFRP

3.3.3 Adequació i preparació del motlle per la construcció del prototip final

En aquesta tercera fase s'ha procedit a fer una adequació i preparació del motlle que utilitzarem per a la construcció dels nostres prototips.

El primer pas ha estat adequar el motlle. S'ha utilitzat unes seccions de fusta per fer el encofrat del formigó sobre la capa de reforç de CFRP, la qual farà de base en aquest motlle. Per tant l'estructura del motlle format per les parets laterals, superior i inferior s'ha realitzat amb taulons de fusta de espessor de 20 mm amb unes dimensions proporcionals a la mesura de bigues que s'ha proposat (2x0,4x0,075 m). Les parets dels taulons de fusta les hem recobert amb paper de film i cinta adhesiva per evitar l'adherència del formigó a les parets i així facilitar el desemmotllament. També s'ha ajustat la mesura de la base conformada pel reforç de CFRP, serrant els extrems per ajustar la geometria a la marcada pel motlle.



Figura 17. Col·locació del motlle sobre el reforç CFRP (esquerra) i doble motlle en procés de cementació

El segon pas ha estat la col·locació de dels taulons de fusta ja adequats sobre l'estructura de reforç i fixar l'estructura de confecció del prototip al terra. Per fer aquest pas hem utilitzat un conjunt de serjants per subjectar les parets laterals amb força, ja que un cop afegim el contingut de formigó aquest aplicarà una pressió força notable a les parets de motlle, i aquest ha d'aguantar correctament. També s'han fixat els taulons entre ells mitjançant cargols per tal d'efectuar el procés constructiu de dos prototips a la vegada, aprofitant així en alguns dels espècimens una de les parets del encofrat tal i com es mostra en la següent figura pertanyent del procés de cimentació, que s'explicarà en els següents passos.

Com s'observa en la figura anterior, aquesta serà la geometria proposada del prototip a realitzar. Tal i com s'ha comentat, el reforç de CFRP conformat amb l'*omega shape* farà de base en aquest motlle i les parets donaran la forma al segment de paret que es vol

obtenir i que s'estudiarà posteriorment. Finalment, l'últim pas en aquesta adequació del motlle del prototip ha estat el segellament de les juntes entre les parets dels taulons de fusta i entre els taulons de fusta i la base de fibra de carboni. D'aquesta forma ens assegurem que no hi hagi fuites de material quan aboquem el contingut de formigó al motlle. El material utilitzat per aquest procediment ha estat plastilina en primeres instàncies, per posteriorment s'ha utilitzat silicona. Aquests dos materials presenten unes capacitats de modelatge molt àmplies a l'hora d'ocupar tots els segments a segellar conflictius en el procés de conformació i assecament. A més a més presenten molt bones propietats adhesives que facilitaran la correcta subjecció entre diferents materials com la fusta i la fibra de carboni. Al ser un material molt porós, retindrà molt bé els líquids que es puguin filtrar a la part inferior, a més de resultar molt fàcil retirar-la en el procés de desemmotllament.



Figura 18. Sagellament de les aristes del motlle amb plastelina

3.3.4 Fabricació i adequació del reforçament intern del prototip. Incorporació nexes unió CFRP amb formigó.

En aquesta quarta fase constructiva dels prototips hem afegit el que serà el nostre reforçament intern a l'estructura en forma de mallat, si s'escau en les característiques constructives dels prototips. També s'ha incorporat el que constituirà el nexa d'unió entre el reforçament extern de CFRP amb la part de formigó que esdevindrà la estructura principal d'aquest prototip.

Primer de tot hem preparat una barreja de resina de epoxi més catalitzador per afegir superficialment a la part interna del reforç de CFRP ja conformat col·locat com a fons del nostre motlle prèviament preparat. Les proporcions d'aquesta barreja no han de ser objectives ja que només han de servir per recobrir la superfície interna amb una tímida capa. Sobre aquesta capa de resina s'han afegit roques petites per tal de que s'adhereixin durant l'asseccament d'aquesta capa superficial i exerceixin com a agents de millora per a la unió del CFRP amb el posterior preparat de formigó, aportant rugositat a la capa interna i afavorint a la correcta constitució dels dos diferents materials en una sola estructura. S'ha afegit sorra sobre aquesta superfície interior del CFRP als prototips que així ho demanava la seva configuració constructiva, amb el fi de obtenir les mateixes prestacions que aporten les roques: més rugositat i adherència del formigó sobre la secció completament llisa de CFRP.



Figura 19. Incorporació de pedres al CFRP

S'han recobert totes les parts més inferiors de la base interna de l'estructura menys les parts superiors de la forma omega que se li va donar al disseny. Això es degut a que aquestes dues parts superiors seran les superfícies en contacte amb el reforç intern en forma de malla de fibra de vidre, per així efectuar una subjecció entre la part interna de formigó que constituirà en la seva majoria l'estructura i la capa de CFRP externa.

A més a més d'unificar aquests dos materials dels que estaran conformats els nostre prototips experimental, aquest mallat intern pretén dotar al prototip d'una sèrie de millores a nivell mecànic. Millorar en la resistència a flexió i una millor distribució de les tensions que afecten les deformacions homogènies de l'estructura es un dels objectius que es pretenen aconseguir amb la implantació d'aquest reforç en forma de malla en el procés constructiu.

El conformat d'aquest mallat de reforç es a base fibra e vidre, un material amb el que el que es vol estudiar la seva viabilitat tant constructiva com d'aplicació pràctica. La construcció d'aquest reforç es a base de tires de fibra de vidre d'uns 4mm entrecreuades perpendicularment entre elles amb un separació equidistant d'uns 3 cm, formant així una distribució quadràtica seguint els eixos longitudinals i transversals del prototip en el cas dels espècimens que hem incorporat malla recta. Per la malla inclinada la disposició d'aquesta malla ha estat de 45° respecte els eixos longitudinals i transversals, formant un patró de reforç en forma de rombe, el qual creiem que permetrà una distribució d'esforços més equivalent en tota la homogeneïtat de l'estructura. A continuació s'observà la constitució i la col·locació d'aquest reforç intern.



Figura 20. Incorporació reforçament amb malla recta de fibre de vidre



Figura 21. Incorporació del reforçament amb malla de fibra de vidre inclinada 45°

També s'han fixat a les parts laterals del motlle mitjançant cinta adhesiva els extrems del mallat, per tal de que quan aboquem el preparat de formigó aquesta reforç mantingui la forma còncaua inversa respecta a la forma d'omega que ofereix la capa de reforç de CFRP. El pas final ha estat adherir el mallat per dues de les seccions que quedaran en contacte amb la part superior de la capa de reforç tal i com s'observa en l'anterior imatge. Per fer-ho s'han utilitzat de tires de fibra de carboni amb combinació del preparat de resina d'epoxi i catalitzador. En aquest cas hem fet varis retalls per fer més pràctica la

col·locació d'aquestes tires longitudinalment a la secció que ocupa la longitud d'aquest prototip. Seguint els mateixos procediments que hem explicat anteriorment, aquestes han sigut les proporcions per a la preparació de la barreja de resina més catalitzador.

- Tires fibra de carboni = 46,60 g (50%).
- Preparació Resina + Catalitzador (50%).
 - Resina Epoxi = 34,50 g.
 - Catalitzador *Resoltech* = 12,10 g (1,750 kg cada 5kg R. Epoxi).



Figura 22. Fixament tires de CFRP a la malla de vidre (esquerra) i assecament (dreta)

Finalment hem recobert aquestes tires amb paper de cuina per protegir la part de resina que hem impregnat del pes que s'ha disposat sobre de l'estructura per tal de que el conjunt quedi ben adherit al mallat de CFRP. Com s'observa en l'anterior imatge, hem afegit una bona quantitat de pes degut a que es molt important la forta fixació d'aquest reforçament intern amb la capa de CFRP. Com només son 2 els punts d'unió entre aquestes dues estructures recaurà en aquestes seccions la responsabilitat de transferir les tensions a suportar. S'ha deixat assecar durant 48 h.

3.3.5 Addició del formigó al motlle

Aquesta es podria considera con última fase constructiva del prototipatge dels nostres models, ja que es l'últim material que ens queda per afegir per conformar la nostra estructura mixta. A més a més el procés d'assecament d'aquest últim pas constructiu es molt més llarg que la resta dels passos anteriors.

El primer pas ha estat la preparació del formigó. Aquesta preparació s'ha dut a terme en una formigonera en la qual hem fet 5 preparacions en total. El motiu de fer-ho així ha estat per facilitar la manipulació de la barreja i així agilitzar el procés d'afegir el formigó al motlle i també per dipositar a la formigonera les proporcions exactes per cada sac de formigó sec que hem utilitzat:

Preparació de formigó

- 1 sac de Formigó sec = 25 kg
- 2 L d'aigua
- A continuació activar formigonera i remoure durant 2 minuts a velocitat constant



Figura 23. Formigonera i sac de formigó

A continuació s'ha abocat el contingut de formigó preparat a una cubeta i s'ha anat omplint el motlle del prototip recobrint el conjunt del mallat i el reforç CFRP ja assecats i fixats entre ells. Amb l'ajuda d'una cubeta, una paleta, guants i sacsejos constants del motlle, s'ha anat repartint homogèniament el formigó produït en 5 tongades de formigonera (un total de 5 sacs) fins omplir quasi tota l'estructura del motlle fins obtenir un gruix de 7,5 cm.



Figura 24. Introducció del formigó al motlle

Un cop omplert la meitat de l'altura del motlle, s'han agafat nivells i cinta mètrica per mesurar que el contingut de formigó es repartís proporcionalment igual per a tota la superfície del motlle i evitar així desequilibris en volum en diferents seccions del prototip un cop assecat. Aquestes diferències no eren gaire significatives, però el tenir una part de la nostra estructura amb un gruix inferior de material base com és el formigó pot perjudicar greument el seu posterior comportament mecànic en assajos posterior, ja que la part amb menys espessor serà la més perjudicada davant tensions produïdes per

moments flectors. A més a més s'han afegit varis sargents més per mantenir la uniformitat estructural del motlle així com seccions de fusta de l'amplada dels prototips en el cas dels encoframents dobles mostrats anteriorment, ja que el pes propi del formigó podria haver arribat a bombar les parets i trencar el paral·lelisme de les seccions laterals.

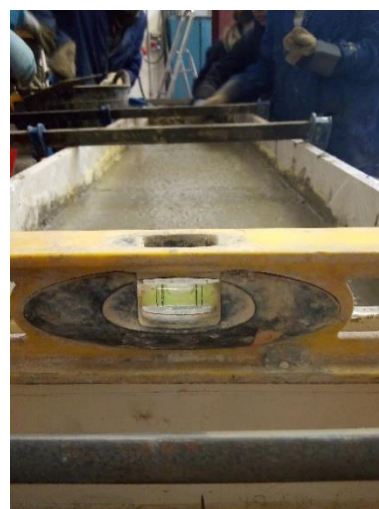


Figura 25. Motlle subjecte amb sargents per evitar deformacions (adalt) i anivellament del motlle (abaix)

Finalment amb l'ajuda d'una paleta plana s'ha allisat tota la superfície superior per donar un acabat el més llis possible. Enacara que sigui un prrorip constructiu, es preten simular que la seva funcionalitat será destinada a la paret d'un dipòsit d'aigua circular, i això significa que la superfície interior ha de ser completament llisa per una repartició també uniforme de la càrrega hidrostàtica sobre la paret de formigó.

3.3.6 Procés de curat del formigó

Per últim s'ha recobert la superfície superior del formigó amb paper film per tal de protegir la capa exterior de cosos externs que es podrien adherir a la superfície durant el procés d'assecatment. Els prototips conserven millor la seva capa externa completament llisa i es protegeixen de les inclemències durant el procés de curat que durarà varies setmanes.

Després toca esperar un període de curat de mínim de 28 dies per tal de que el formigó es consolidi correctament i la seva composició s'endureixi formant així una estructura de perfil rectangular ben adherida al reforç extern de CFRP. Passats aquest 28 dies hem desenmotllat els prototips i aquests han estat els resultats obtinguts.



Figura 26. Protecció dels prototips amb paper film



Figura 27. Resultat final d'un dels prototips, 1



Figura 28. Resultat final d'un dels prototips, 2

4 Configuració dels assaigs i instrumentació

En aquest apartat del treball es procedeix a explicar quina ha estat la configuració dels assaig realitzats, el correcte muntatge de l'equipament i la instrumentació necessària executar la part d'experimentació pràctica amb èxit.

4.1 ASSAIG DE RESISTENCIA A COMPRESSIÓ

L'assaig escleromètric o d'índex de rebot mitjançant escleròmetre és una prova no destructiva de la resistència del formigó. S'efectua amb el martell SCHMIDT i el seu funcionament vindria a ser el següent: s'obté un valor "R" (índex de rebot) que es tracta d'una unitat adimensional que relaciona la duresa superficial del formigó amb la seva resistència de manera experimental. Aquest Martell d'Schmidt o escleròmetre pesa menys de 2 kg, té una forta energia d'impacte amb un funcionament i lectura de dades és molt simple.

S'utilitzarà el escleròmetre d'acord amb les instruccions de manipulació del fabricant. S'activa el escleròmetre almenys tres vegades, abans de prendre qualsevol lectura, per assegurar que funciona correctament. Abans d'una seqüència d'assaig sobre una superfície de formigó, es realitzaran i registraran lectures sobre l'enclusa de tara per assegurar que es troben dins del rang recomanat pel fabricant.

L'escleròmetre es subjectarà fermament en una posició que permeti transmetre mitjançant el plançó un impacte perpendicular a la superfície d'assaig. La pressió sobre el plançó ha de ser gradualment incrementada fins que es produeixi l'impacte del escleròmetre. [15]

Com es tracta d'un instrument totalment manual hem de carregar l'èmbol per enviar-lo amb una energia d'impacte fixa. Per a això pressionem el mateix sobre la superfície del formigó (no hi ha cap mediació encara) Un cop l'èmbol arriba a un determinat punt un ressort l'allibera i impacta el formigó (no mesurem res encara). L'èmbol impacta sobre la superfície i depenent de la duresa de mateixa, rebota amb més o menys força. És la resposta de rebot la qual desplaça una guia sobre una escala (de 10 a 100) i aconsegueix el mesurament. L'instrument inclou un gràfic on es representa en escala de MPa equivalent al valor adimensional aconseguit. També conté diferents corbes que representen el punt que haurem d'anar a buscar segons la direcció del impacte (vertical sentit descendent, vertical sentit ascendent o horitzontal).

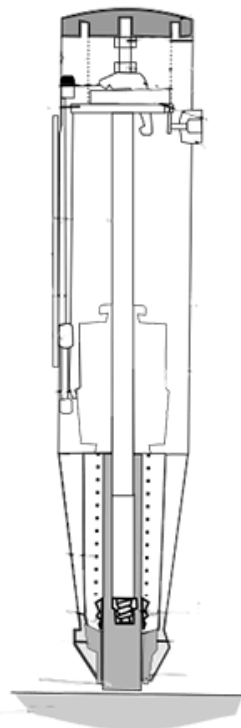


Figura 29. Secció escleròmetre

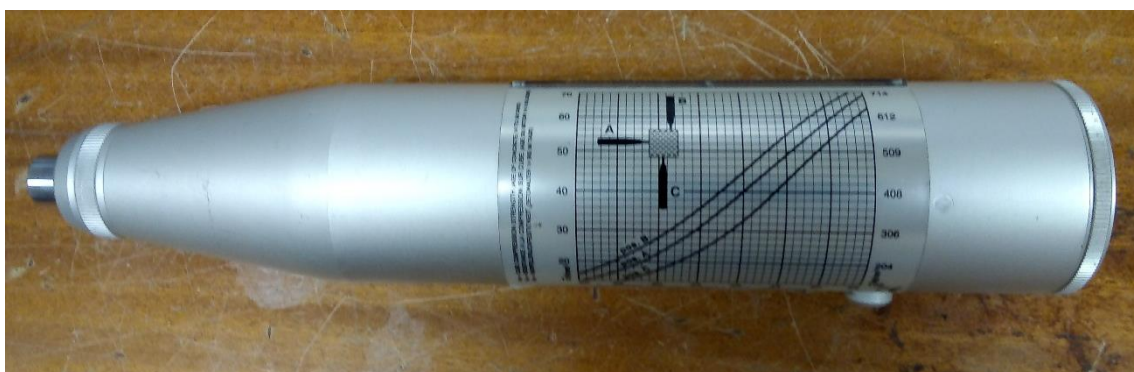


Figura 30. Escleròmetre amb detall de gràfica d'interpretació de rebot

El model d'escleròmetre utilitzat es de la marca *InCotecnic*, empresa especialitzada en material de laboratori per dur a terme assajos en construcció i enginyeria civil.

El resultats de resistència a compressió segons l'índex de rebot aconseguit en els diversos assaigs escleromètrics realitzats es troben recollits en la següent taula.

	Resistencia compressió (MPa)
Pedra 1	19,00
Pedra 2	20,75
Pedra + Malla 1	20,00
Pedra + Malla 2	22,60
Pedra + Sorra + Malla 1	16,40
Pedra + Sorra + Malla 2	20,40
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	20,00
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	20,90

Tabla 2. Resultats assaig resistència a compressió

4.2 ASSAIG DE FLEXIÓ

Un cop finalitzat amb èxit el procés constructiu dels prototips s'ha pogut comprovar que després del període de curat i el desemmotllament, els espècimens presenten un acabat prou satisfactori per donar per vàlid un dels objectius, que es el de la viabilitat constructiva d'una estructura conformada a base de materials mixtes. Ara caldrà assajar amb ells per tal de comprovar les seves propietats mecàniques a flexió front esforços de carrega puntual.

Els antecedents d'aquest assaig han estat una investigació de com s'haurien d'assajar els prototips per tal de que el format del test mecànic i els resultats que es puguin obtenir siguin d'utilitat i reflecteixin les propietats de resistència mecànica que els prototips a escala pilot han de ser capaços de suportar.

Ja que es volen estudiar els prototips en les condicions estructurals més desfavorables per comprovar la seva resistència mecànica màxima a flexió, es coneix experimentalment que el punt de l'estructura que patirà més deformacions es la part central on s'aplicarà la càrrega puntual per part de l'actuador i on també tindrem una fletxa màxima i la concomitància d'esforços de flexió i tallant. Per tant l'assaig de flexió al laboratori es durà a terme col·locant el prototip sobre dos recolzaments als extrems de la biga i aplicant una càrrega puntual situada al centre geomètric del prototip mitjançant una actuador hidràulic de 50kN. Aquesta es la disposició d'assaig amb la que podrem simular més acuradament aquesta deformació per flexió, quedant-nos amb la informació de desplaçament unitari obtingut fins al punt de falla total de l'estructura.

Un cop s'ha definit com es desenvoluparà l'assaig de flexió, s'ha portat a terme una preparació de tot l'equip necessari i el material que utilitzarem, així com una preparació i col·locació prèvia del prototip a la zona d'assaig. Primerament es fa un llistat de l'equip que s'utilitzarà en aquest experiment:

Actuador MTS 50kN de Rang. Fixat al banc de proves i connectat un compressor d'alimentació que activarà l'aplicació de càrrega a desplaçament constant de 2mm/min.



JACK. Controlador del actuador MTS connectat simultàniament al PC i amb el propi software de MTS per la lectura dades i configuració de paràmetres.



Potenciòmetre 100 mm de Rang. Servirà per mesurar el desplaçament en el punt de fletxa màxima durant l'assaig de flexió. Esta situat al centre real de l'estructura, on l'extrem del potenciòmetre està fixat a una platina unida a la part inferior de l'estructura i que ens servirà de referència per mesurar el desplaçament.



<p>Sensor LVDT 20 mm de rang. Servirà per veure el descens dels suports durant la primera part de l'assaig i per controlar el lliscament del formigó respecte l'CFRP en la resta de l'experiment fins la falla.</p>	
<p>Banda extensiomètrica de 4 fils. Dotada d'una resistència elèctrica de 350 Ω. Aquest sensor ens servirà per mesurar les deformacions del CFRP en $\mu\text{m/m}$.</p>	
<p>Adquiridors HBM model MX1615 i MX840A. Dispositius processadors de les dades obtingudes pels sensors, els potenciòmetres i les bandes extensiomètriques. A més a més també enregistra les dades provinents del controlador JACK: desplaçament dels elements auxiliars de carrega i la càrrega aplicada per l'actuador. Enregistra a 50 Hz, per tant a una capacitat de 50 lectures per segon. El software utilitzat per aquest dispositiu es el <i>CatMan AP</i></p>	

Tabla 3. Taula equipament i instrumentació assaig de flexió

Evidentment s'han utilitzat altres materials per portar a terme aquest assaig però el conjunt d'equips més importants per recol·lectar la informació necessària ha estat llistada en la taula anterior. A continuació es mostra una figura del muntatge de l'assaig i la connexió de tots els equips mencionats:



Figura 31. Muntatge complet per l'assaig de flexió

Per la disposició dels prototips en la zona d'assaig, degut a les seves grans dimensions, hem hagut de col·locar suports capaços de resistir el pes propi de l'estructura així com la força que exercirà l'actuador durant la prova. S'ha col·locat una estructura cilíndrica al punt dels recolzaments per tal de que al aplicar força amb l'actuador la biga pugui arribar a cedir lleugerament i acomodar-se durant l'assaig, evitant el lliscament del CFRP i per tant evitar qualsevol lectura errònia per part dels sensors.

També es destaca d'aquest muntatge la importància de la col·locació dels sensors de mesura dels desplaçaments per càrrega en els seus respectius recolzaments separats del muntatge conjunt del prototip al banc de proves. Aquesta disposició exterior al conjunt es per evitar qualsevol lectura errònies de dades que podria venir de haver fixat els sensors, per exemple, a les mateixes potes de recolzament de l'espècimen en cas del sensor LVDT o a la mateixa estructura base del banc de proves en el cas del potenciómetre de 100 mm. Tan mateix, els valors enregistrats a l'adquiridor HBM provinents del controlador de l'actuador MTS (desplaçament dels elements auxiliars de càrrega i càrrega aplicada) venen arrossegant una sèrie de erros en el que engloba la lectura dels paràmetres reals. Això es degut a que el software de l'equip MTS no té en compte les deformacions provocades per la tira de goma situada entre el perfil IPN i el

prototip (fent una funció de protecció), així com els desplaçaments degut a les toleràncies mecàniques que poden tenir els elements que formen part del conjunt de auxiliar de càrrega un cop l'actuador es operatiu. Per tant es molt important tenir una lectura de desplaçament auxiliar en la fletxa màxima gràcies als 2 potenciómetres muntats al centre de la biga.



Figura 32. Elements auxiliars de l'actuador

El sensor de la banda extensiomètrica situada a la part inferior del centre de l'estructura posseeix una galga de lectura de micodeformacions. Connectarem l'altre extrem dels cables de la galga a l'adquiridor *HBM* amb una configuració de factor de correcció *Gage Factor* del $2,05 \pm 1,0\%$. La lectura de dades de la resistència multiplicada per aquest factor de correcció donarà una sensibilitat major en la mesura i una millor lectura de resultats.

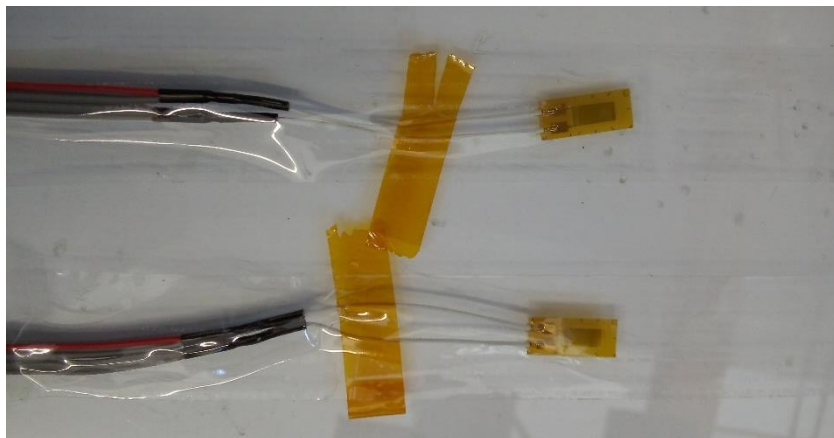


Figura 33. Galgues extensiomètriques

Un cop feta la preparació del prototip al banc de proves, la connexió dels diferents equips que formaran part d'aquest assaig i la configuració dels paràmetres pertinents al software utilitzat per aquest assaig (*CatMan*), s'ha procedit a donar començament al assaig de flexió sobre la nostra estructura prototip.

Aquests son els paràmetres inicials que ens mostra el programa *CatMan*, connectat del adquiridor *HBM* al PC utilitzat. A continuació es passen a nombrar el conjunt de paràmetres recollits per cada canal (*CH*) d'entrada pertanyent a un sensor específic.

Adquiridor MX840A (4 lectures de desplaçament):

- **CH 1** → Sensor desplaçament LVDT 1 (Posterior)
- **CH 2** → Sensor desplaçament LVDT 2 (Anterior)
- **CH 7** → Potenciòmetre 1 (esquerra)
- **CH 8** → Potenciòmetre 2 (dreta)

Bandes extensiomètriques (Galgues de 4 fils):

- **CH 15** → Galga superior (cresta del CFRP)
- **CH 16** → Galga inferior (vall del CFRP)

Actuador i elements auxiliars:

- **CH 5** → Força actuador (kN)
- **CH 6** → Desplaçament actuador (mm)

Channel	Sample	Unit	Min	Max
MX840A_0_CH 1	0.00036	mm	-0.00123	0.00456
MX840A_0_CH 2	0.000	mm	-0.00870	0.000
MX840A_0_CH 5	0.00822	kN	0.00115	0.3397
MX840A_0_CH 6	0.1250	mm	-0.00076	58.05
MX840A_0_CH 7	-13.10	mm	-13.11	-0.1094
MX840A_0_CH 8	-0.00080	mm	-0.02388	0.04929
MX1615_2_CH 15	0.2645	µm/m	-1003.0	0.4258
MX1615_2_CH 16	0.3983	µm/m	-612.14	0.3983

Figura 34. Configuració de canals (CH) per al programa *CatMan*

Per altra banda, el següent recuadre mostra les dades de partida de l'experiment provinents del software del Controlador *JACK*. Aquesta pantalla es mostra independentment a la anterior figura ja que el controlador només enregistra les dades del Actuador, com son la càrrega aplicada i el desplaçament dels elements auxiliars de càrrega, que ha estat de 2mm/min. Son els valors que s'enregistraran paralelment als canals *CH5* i *CH 6* del Adquiridor *HBM*, mostrats a la pantalla del programa *CatMan*, ja que com s'a comentat anetriorment, aquests dos paràmetres enregistrats durant l'assaig son igualment sintetitzats per l'adquiridor amb una connexió directa des del controlador de l'actuador MTS.

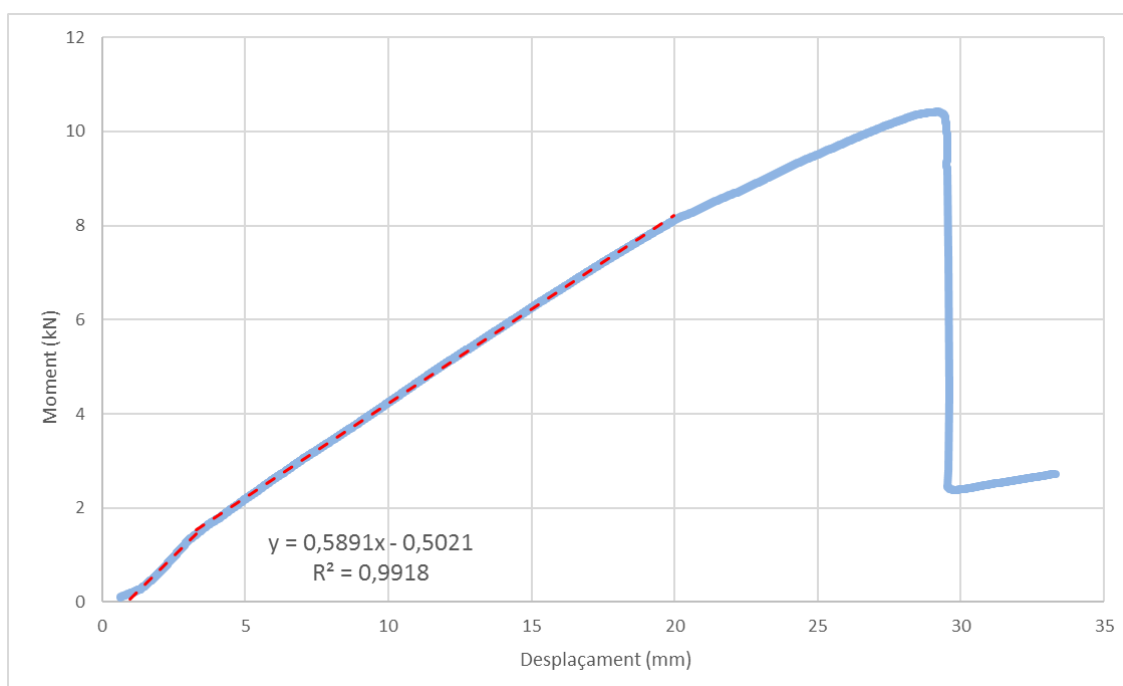


Figura 35. Desplaçament de l'actuador i força del actuador mostrat en el software del PC connectat al JACK

5 Resultats i anàlisi

5.1 Primera linealitat

En aquesta primera part de càlculs teòrics en volgut observar el comportament dels prototips des d'un punt de vista estructural aplicant el teorema de la homogeneïtzació, on l'estudi s'ha basat principalment en el comportament de les tensions donades per les deformacions de les dues galgues treballant a tracció davant la tensió donada per la formula teòrica de flexió homogènia. Per això, hem utilitzat part dels valors trobats en les gràfiques experimentals



Gràfica 1. Gràfica Moment vs. Desplaçament (Pedra + Malla 2)

Troblem els punt d'inflexió on suposem que l'estructura experimentalment ha treballat homogèniament a tracció de forma correcta, i a partir de la qual l'estructura segueix treballant homogèniament però comencen a sortir fissures fins al punt de trencament. A més a més observem que la correlació de les nostres dades es molt adient ja que es molt proper a 1. D'aquest punts necessitarem les següents dades:

La resistència a compressió també s'ha extret del apartat experimental trobada amb l'escleròmetre.

Proveta	Resistència a compressió del formigó (MPa)	Deformació superior (m/m)	Deformació inferior (m/m)	Punts Inflexió grafica F (kN)	Punts Inflexió grafica M (N·mm)
Pedra 1	19,00	0,0000130	0,0000620	0,75	376709
Pedra 2	20,75	0,0000054	0,0000248	0,77	385875
Pedra + Malla 1	20,00	0,0000000	0,0001648	2,35	1173350
Pedra + Malla 2	22,60	0,0000362	0,0001479	2,56	1278355
Pedra + Sorra + Malla 1	16,40	0,0000062	0,0001099	1,45	724480
Pedra + Sorra + Malla 2	20,40	0,0000130	0,0000640	1,22	611825
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	20,00	0,0000225	0,0000933	1,64	821400
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	20,90	0,0000181	0,0001143	1,51	757000

Tabla 4. Taula propietats mecàniques prototips 1

Primerament hem calculat el mòdul elàstic del formigó amb la següent formula, ja que necessitem la dada més endavant per trobar la tensió de l'estructura.

$$E_c = 15100 \cdot \sqrt{f_c}$$

On f_c es la resistència a compressió en kg/cm² trobada experimentalment en la part pràctica durant l'assaig de resistència a compressió realitzat amb l'escleròmetre.

Seguidament s'ha fet el càlcul de la tensió per ambdós extrems del CFRP, tant pels valors de deformació de la cresta(part superior) com de la vall (part inferior).

$$\sigma = E_c \cdot \varepsilon$$

On el mòdul elàstic agafat per realitzar l'anàlisi ha estat seleccionat bibliogràficament i ha estat de 45000 Mpa.[11]

Finalment s'ha calculat la tensió màxima a tracció segons la formula donada per l'article 39 de la EHE sobre estructures mixtes.[4]

$$\sigma_f = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_c^2} \cdot 0,7$$

On s'ha tornat a utilitzar els valors de resistència a compressió experimentals en MPa i s'ha aplicat un factor de correcció de 0,7 segons normativa de la EHE per càlcul d'estructures mixtes. [4]

En la següent taula es recullen els valors obtinguts pels càlculs pertinents de les tensions als extrems superiors i inferiors del CFRP així com el valor de tensió a tracció màxima per a estructures mixtes de CFRP i formigó.

Proveta	Tensió de tracció a la cresta del CFRP (MPa)	Tensió de tracció a la vall del CFRP (MPa)	Tensió màxima de tracció donada per l'Art. 39 EHE (MPa)
Pedra 1	0,59	2,79	1,50
Pedra 2	0,24	1,12	1,59
Pedra + Malla 1	0,00	7,41	1,55
Pedra + Malla 2	1,63	6,66	1,68
Pedra + Sorra + Malla 1	0,28	4,94	1,36
Pedra + Sorra + Malla 2	0,58	2,88	1,57
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	1,01	4,20	1,55
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	0,81	5,14	1,59

Tabla 5. Taula propietats mecàniques prototips 2

Amb els resultats obtinguts observem que les tensions a tracció resultants dels càlculs per la secció de la vall de CFRP superen en la seva majoria els valors de tensió de tracció màxima permesa segons normativa de la EHE. Al tractar-se de la zona més desfavorable a esforços de tracció, ja que ocupa la major àrea d'adherència amb el formigó i està situada al extrem de la secció, considerem que a partir d'aquest punt d'inflexió mostrat anteriorment el comportament de la biga segueix sent homogeni però hi comencen a aparèixer fissures que s'estendran en direcció ascendent de la figura conforme vagi augmentant la càrrega. Per contra, s'observa que la tensió a tracció soferta a la part superior de la cresta està dins la tensió màxima permesa, per tant encara hi ha 40 mm d'estructura que treballa sense fissures que debilitin la homogeneïtat.

També s'han calculat els valors de les tensions màximes als extrems de l'estructura amb la formula que dona el teorema de homogeneïtzació estructural, amb la qual es trobaran les tensions obtingudes en funció del valor del moment exacte al punt d'inflexió respecte al centre de gravetat de l'estructura.

$$\sigma_h = \frac{M_x}{I_G} \cdot y$$

On el moment d'inèrcia calculada teòricament es del valor de $1,2 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$ i la y es l'altura respecte la coordenada del centre de gravetat de la figura. Per la tensió de l'extrem inferior agafarem la distancia de la coordenada y del C.G. i la diferencia respecte el gruix total per l'extrem superior.

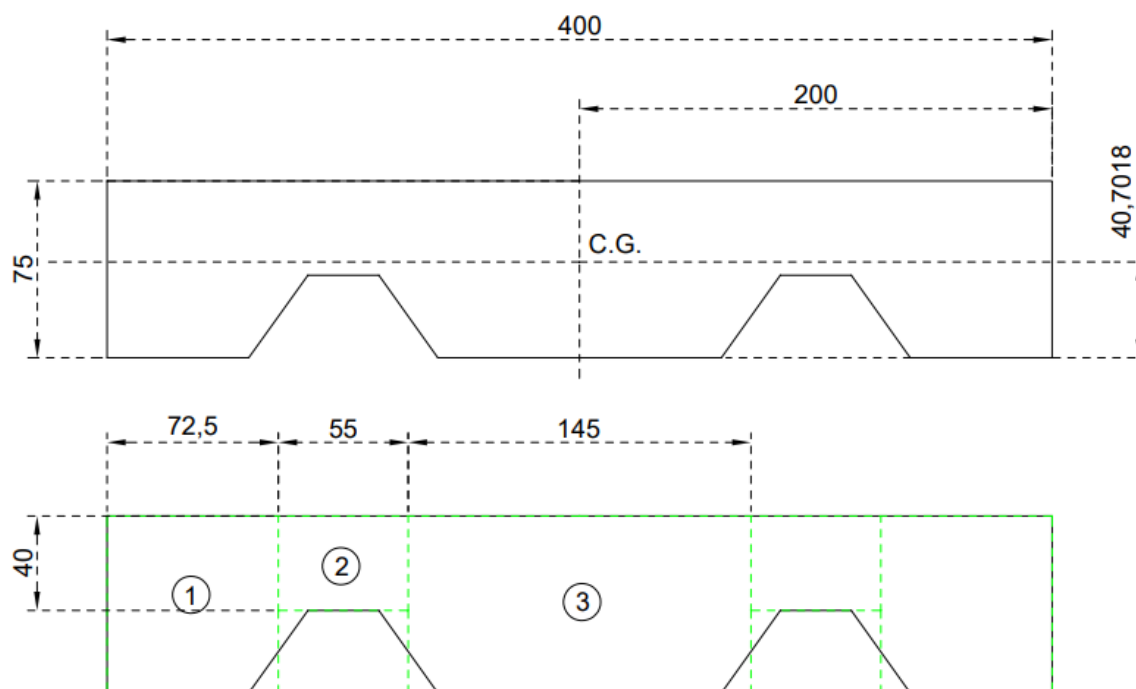


Figura 36. Càlcul del moment d'inèrcia

Pel càlcul del moment d'inèrcia hem fet un reajustament geomètric on amb la mateixa àrea de superfície hem creat 5 rectangles diferents i calcular la inèrcia de cada un d'ells, fer la suma i obtenir la inèrcia total de la nostra biga aplicant el teorema d'Steiner.

$$I_0 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

$$I = I_0 + A \cdot r^2$$

$$I = 1,2 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

A continuació es mostren els resultats de les tensions als extrems superior i inferior de la secció amb la formula del teorema de homogeneïtzació.

Proveta	Tensió extrem superior estructura (Mpa)	Tensió extrem inferior estructura (Mpa)
Pedra 1	1,08	1,28
Pedra 2	1,08	1,28
Pedra + Malla 1	3,59	4,26
Pedra + Malla 2	3,59	4,26
Pedra + Sorra + Malla 1	2,15	2,55
Pedra + Sorra + Malla 2	1,44	1,70
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	2,15	2,55
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	2,15	2,55

Figura 37. Taula propietats mecàniques prototips 3

I per acabar aquest primera linealitat de resultats s'ha volgut trobar l'error absolut entre el valor teòric real de la tensió a tracció a la vall del CFRP i el valor de tensió a l'extrem inferior calculat segons la teoria d'homogeneïtzació.

$$\varepsilon_R = \left| \frac{\sigma_h - \sigma}{\sigma} \right| \cdot 100$$

On σ_h es el valor del càlcul per a la tensió a l'extrem inferior de l'estructura i σ es el valor real de tensió a tracció a la vall del CFRP. L'error absolut entre les tensions queda recollit en la següent taula.

Proveta	Error absolut entre les tensions a l'extrem de la biga (%)
Stone 1	54,22223302
Stone 2	14,26012692
Stone + Mesh 1	42,57518355
Stone + Mesh 2	36,0285448
Stone + Sand + Mesh 1	48,33021022
Stone + Sand + Mesh 1	40,82415319
Stone + Sand + Mesh 45 1	39,1527162
Stone + Sand + Mesh 45 2	50,33733066

Tabla 6. Taula error aboslut entre les tensions

Com a resultat d'aquest últim càlcul, podem parlar d'uns errors força alts respecte als càlculs teòrics i els resultats experimentals, on la majoria d'errors oscil·len entre valors del 40%. Es destaca que uns dels motius d'aquest marge d'error tan gran ha estat entre d'altres factors la baixa lectura de deformacions per als valors equivalents al punt d'inflexió del comportament homogeni de l'estructura. Estem parlant de deformacions de l'orde de $5 \cdot 25 \cdot 10^{-6}$ m/m per la galga de la cresta i de $5 \cdot 20 \cdot 10^{-5}$ m/m per la galga de la vall. Hi ha molta sensibilitat instrumental i aspectes com la vibració o petits moviments per part de les connexions amb l'adquiridor poden alterar el més mínim la lectura d'aquestes deformacions.

Per tant es consideren aquest valors com uns valors massa baixos per a una correcta aproximació real d'aquesta tensió experimental. Degut a aquest fets, s'ha decidit seguir amb un anàlisi més exhaustiu en busca d'una possible millor correlació entre els valors teòrics calculats i els valors experimentals aconseguits amb l'assaig de flexió. Les següents dades a analitzar en aquest estudi seran les obtingudes en el moment de trencament de la biga.

5.2 Punt de Trencament

En aquest apartat s'analitza el comportament de l'estructura híbrida en el moment de màxima càrrega.

És un punt en el qual l'estructura deixa de treballar com un únic bloc, si no que degut la fracturació del formigó, aquest treballa de manera independent de com treballa el CFRP. De manera que el CFRP en aquest punt treballa a flexió mentre que el formigó passa a

treballar un cap de compressions situat a la part superior de l'estructura, considerant que l'aportació del formigó situat al centre és negligible degut a la fracturació del mateix.

Per veure si el comportament de l'estructura compleix les condicions esmentades al paràgraf anterior, es decideix calcular, de manera analítica, el moment al qual està sotmesa l'estructura.

Es calcularà la força resultant equivalent (R_T) que està suportant el CFRP i l'alçada d'on estaria aplicada aquesta força. Com l'estructura està sotmesa a un moment, la força de tracció que es troba al CFRP és la mateixa que la força de compressió a la que està sotmesa el formigó. Suposant un comportament de l'estructura com el que s'observa a la següent figura. Per simplificar, es decideix calcular per a la meitat de l'estructura, ja que és simètrica.

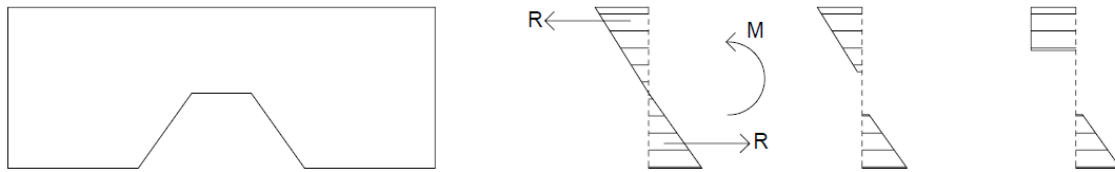


Figura 38. Resultant equivalent R_T i Moment en secció de la biga

Per efectuar aquest càlcul, primer es calcula les tensions a les quals està sotmès el CFRP en el moment de màxima càrrega amb l'expressió:

$$\sigma = E_{CFRP} \cdot \varepsilon$$

On σ és la tensió en MPa, E_{CFRP} és el mòdul de Young del CFRP, que és 45000 MPa, i ε és la deformació de la galga extensiomètrica.

Amb les dimensions de l'estructura, és possible calcular la força que està suportant cada part del perfil de CFRP, de manera que la força que està resistint (R) és:

$$R = \sigma \cdot b \cdot h$$

On R és la força resultant (N), σ és la tensió (N/mm²), b és l'ample de l'aresta (mm) i h és el gruix del CFRP que és 1,5 mm.

Es fa la suma de res forces R_i de manera que s'obté la força resultant de tota l'estructura com:

$$R_T = 2 \cdot \sum_i R_i$$

De manera que s'ha aconsegueix una força equivalent a la que està suportant el CFRP, i ara es busca el centroid de d'on estaria aplicada que dóna el mateix moment al que està sotmès.

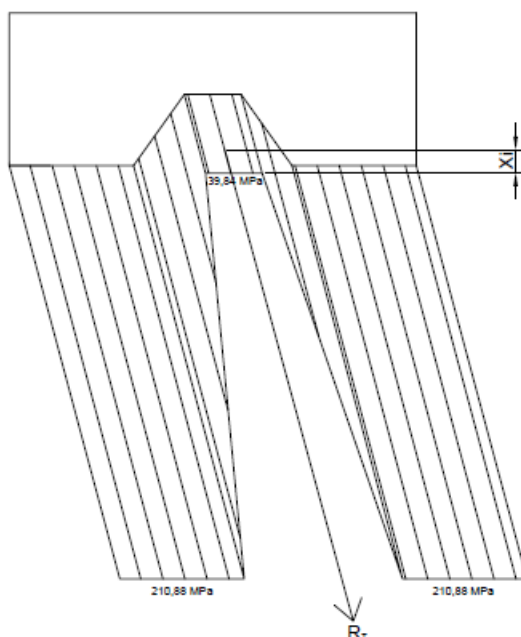


Figura 39. Centroide corresponent a R_t a la nostra secció de biga per Pedra + Malla 1

Per trobar el centroide s'utilitza la següent expressió:

$$X_i = \frac{2 \cdot \sum_i R_i \cdot x_i}{R_T}$$

A la següent taula es pot veure el resultat d'aquest procediment.

Proveta	Moment de trencament (N·m)	ϵ_s	ϵ_i	Tensió a la cresta del CFRP (MPa)	Tensió a la vall del CFRP (MPa)	R total de la biga (N)	Centroide força R inferior (X_i)
Stone 1	5830,10	0,001003	0,004047	45,14	182,12	98942,72	13,24
Stone 2	2436,93	0,000096	0,001142	4,32	51,39	26075,79	5,34
Stone + Mesh 1	6015,04	-	-	-	-	-	-
Stone + Mesh 2	10414,28	0,000885	0,004686	39,84	210,88	111843,99	3,09
Stone + Sand + Mesh 1	2070,22	0,000057	0,000853	2,56	38,37	19324,81	2,60
Stone + Sand + Mesh 1	3773,87	0,000552	0,001938	24,84	87,23	48094,54	3,44
Stone + Sand + Mesh 45 1	10636,76	0,001327	0,0055630	59,73	250,34	135496,30	3,28
Stone + Sand + Mesh 45 2	7141,80	0,000787	0,0036243	35,41	163,10	87509,59	3,20

Tabla 7. Procés del càlcul del centroide X_i

A continuació es calcula el cap de compressions que suporta el formigó.

Primer s'ha de comprovar si el comportament del formigó segueix la suposició inicial. Per dur a terme aquesta comprovació es calcula la tensió a la que està sotmesa el formigó considerant que la deformació que pateix el formigó segueix el comportament donat a partir de les deformacions de les galgues extensiomètriques, expressió X, per a una $x = 75\text{mm}$.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_I}{0 - 35} \cdot x + \varepsilon_I$$

Amb, un altre cop l'expressió X, es calcula la tensió de compressió que suporta el formigó a l'extrem superior de l'estructura i es compara amb la resistència a compressió del formigó, donada per l'escleròmetre.

En el cas que

$$\sigma_i = E_{\text{formigó}} \cdot \varepsilon_i < f_c$$

Llavors la suposició inicial es manté i es calcula l'amplada que tindrà aquesta distribució en forma de triangle, mitjançant la fórmula de la recta que uneix els dos extrems de l'estructura.

Per calcular el l'alçada d'aquest triangle, es calcula la integral entre aquest punt A i 75mm, de l'àrea del triangle multiplicat per E_{CFRP} , que ha de tenir el mateix valor que R_T .

$$\int_A^{75} \left(\frac{400 \cdot x}{2} \right) \cdot E_{\text{CFRP}} dx = R_T$$

En l'altre cas, on

$$\sigma_i = E_{\text{formigó}} \cdot \varepsilon_i > f_c$$

La suposició inicial queda descartada, i passem a una segona suposició, on el cap de compressions té una distribució rectangular, on la tensió que suporta és la tensió màxima de compressió.

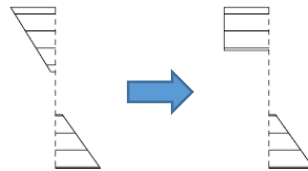


Figura 40. Nova suposició distribució rectangular pel cap de compressió

Per trobar l'alçada d'aquest rectangle, es calcula que:

$$\sigma_{\text{COMPRESSIÓ}} \cdot 400\text{mm} \cdot x\text{ mm} = R_T$$

On $\sigma_{\text{COMPRESSIÓ}}$ està en MPa i R_T en N.

A la següent taula podeu veure que la tensió que suporta el formigó a la part superior de l'estructura és en tots els casos superior a la resistència a compressió del formigó calculada, de manera que tots els càlculs següents es basen en la segona suposició

Proveta	Resistència a compressió (MPa)	Tensió de compressió a la part superior de l'estructura calculada (MPa)	Alçada cap de compressions (mm)	Centroide del cap de compressions*
Stone 1	19,00	51,53	13,02	6,51
Stone 2	20,75	53,85	3,14	1,57
Stone + Mesh 1	20,00	-	-	-
Stone + Mesh 2	22,60	56,20	12,37	6,19
Stone + Sand + Mesh 1	16,40	47,87	2,95	1,47
Stone + Sand + Mesh 1	20,40	53,39	5,89	2,95
Stone + Sand + Mesh 45 1	20,00	52,87	16,94	8,47
Stone + Sand + Mesh 45 2	20,90	54,04	10,47	5,23

Tabla 8. Taula propietats mecàniques dels prototips 4

*Respecte la cota superior de l'estructura.

Finalment es calcula el moment que l'estructura està suportant, aplicant el moment al centroide d'una de les forces R.

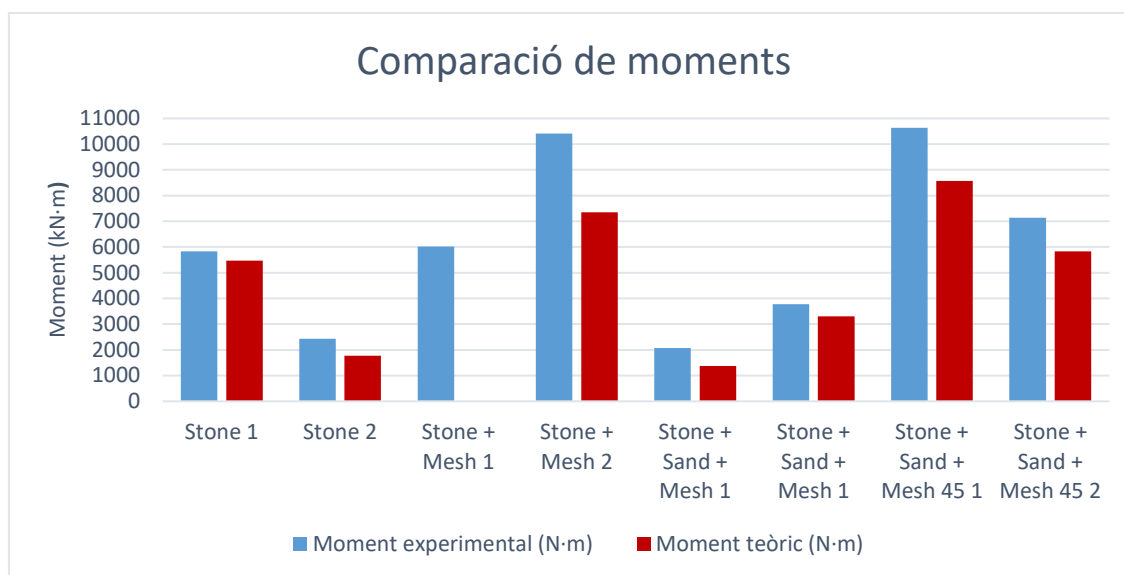
$$M_A = (75 - \text{Centroide cap de compressions} - \text{centroide CFRP}) \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \cdot R_T$$

Obtenint així el moment teòric que està suportant l'estructura.

A la taula X es compara el moment experimental de trencament amb el moment teòric que està suportant l'estructura.

Proveta	Moment experimental (N·m)	Moment teòric (N·m)	Error relatiu (%)
Stone 1	5830,10	5466,18	6,24
Stone 2	2436,93	1775,35	27,15
Stone + Mesh 1	6015,04	-	-
Stone + Mesh 2	10414,28	7350,67	29,42
Stone + Sand + Mesh 1	2070,22	1370,66	33,79
Stone + Sand + Mesh 2	3773,87	3299,75	12,56
Stone + Sand + Mesh 45 1	10636,76	8570,70	19,42
Stone + Sand + Mesh 45 2	7141,80	5825,36	18,43

Tabla 9. Taula error absolut entre Moment experimental i moment teòric



Gràfica 2. Gràfica comparació de moments reals i teòrics

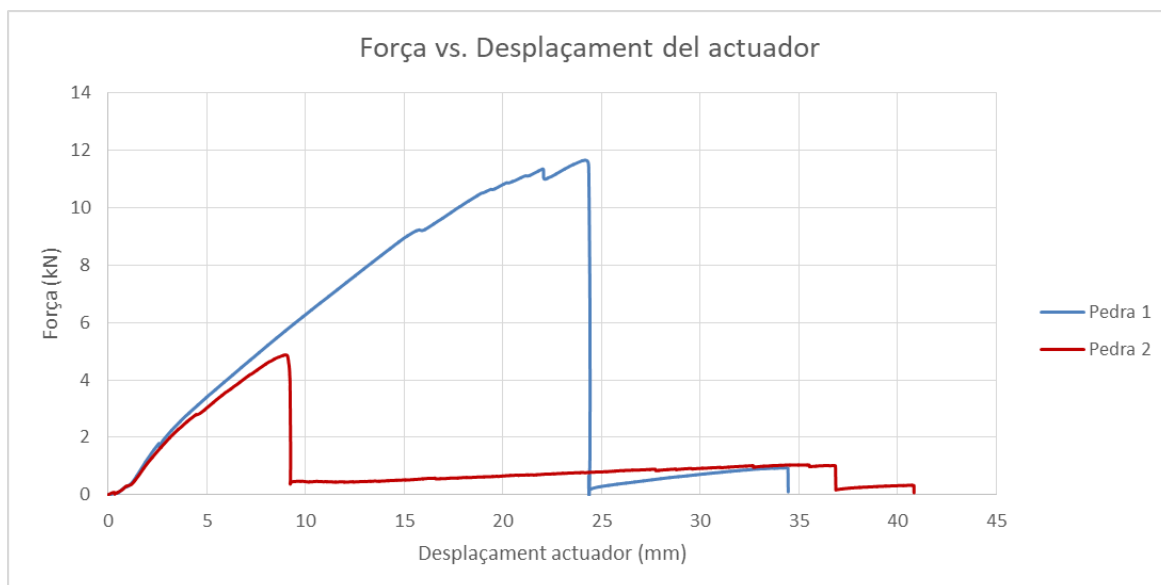
S'observa que el moment teòric difereix del moment experimental amb diferències de entre el 6 i 34%. Per valors inferiors al 20% és pot acceptar que hi ha una certa relació en la forma de treball real de l'estructura i la suposició que nosaltres hem enunciat, a més, tenint en compte que tot el procediment ha estat manual (amb totes les variacions que això provoca) considerem que l'experimentació compleix amb les suposicions enunciades i per tant totes les bigues han estat fabricades i assajades correctament.

5.3 Resultats experimentals obtinguts

En aquest apartat es passen a comentar i analitzar els resultats obtinguts en els assajos de Flexió.

5.3.1 Cas de Formigó + CFRP + Pedra

El primer cas analitzat com ja s'ha comentat ha estat el del prototip constituït únicament per formigó i pedres més el reforçament de CFRP, ja que van ser els primers en construir-se i assecar-se i els que hipotèticament presenten les condicions més desfavorables de treball ja que la seva unió amb el CFRP no compta amb l'adherència extra d'un mallat. Sorprenentment, els resultats obtinguts per valors de força i moments màxims front el desplaçament obtingut ens han sorprès gratament.

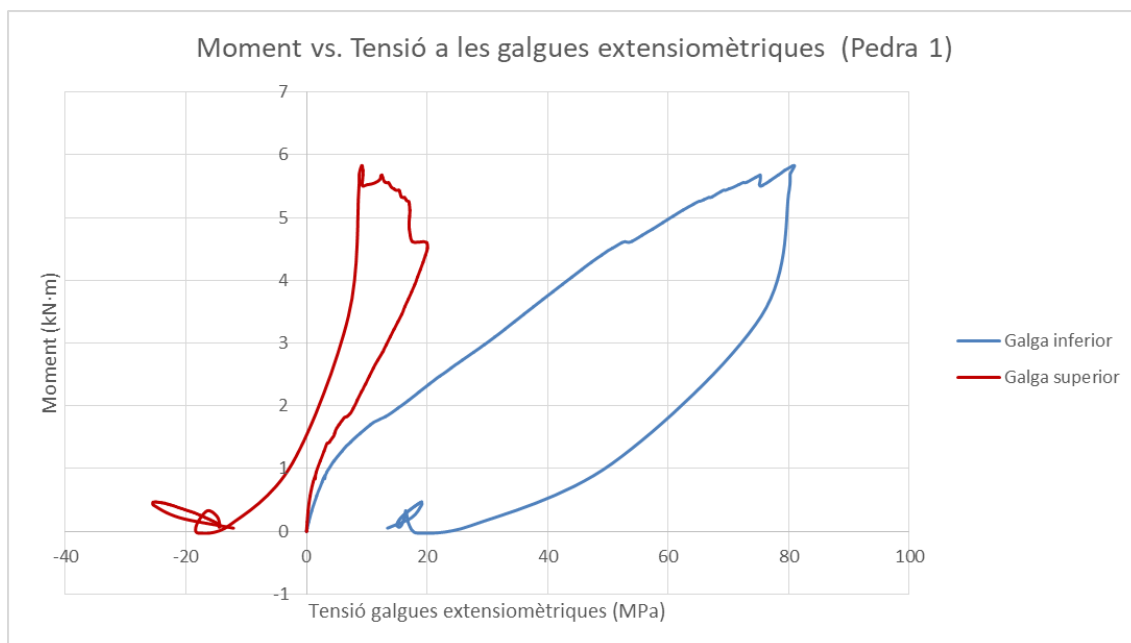


Gràfica 3. Força vs. desplaçament (Pedra)

La primera representació gràfica ha estat la de la força del actuador front el desplaçament d'aquest. S'han ajuntat els dos resultats obtinguts dels dos espècimens amb les mateixes característiques constructives (Pedra 1 i Pedra 2) per tal d'observar més fàcilment si s'observa una similitud del comportament mecànic que marqui una bona correlació entre aquest dos espècimens del mateix tipus.

Ràpidament s'ha observat que la força necessitada i el desplaçament efectuat fins al punt de ruptura es notablement superior en el cas de Pedra 1, el qual ha arribat a la xifra màxima de 11,66 kN de força amb un desplaçament de l'actuador de 24,18 mm. En el cas del prototip Pedra 2 ha marcat el seu màxim a 4,87 kN i 8,96 mm, resultat que no arriba ni a la meitat del valor que ha aconseguit el model Pedra 1.

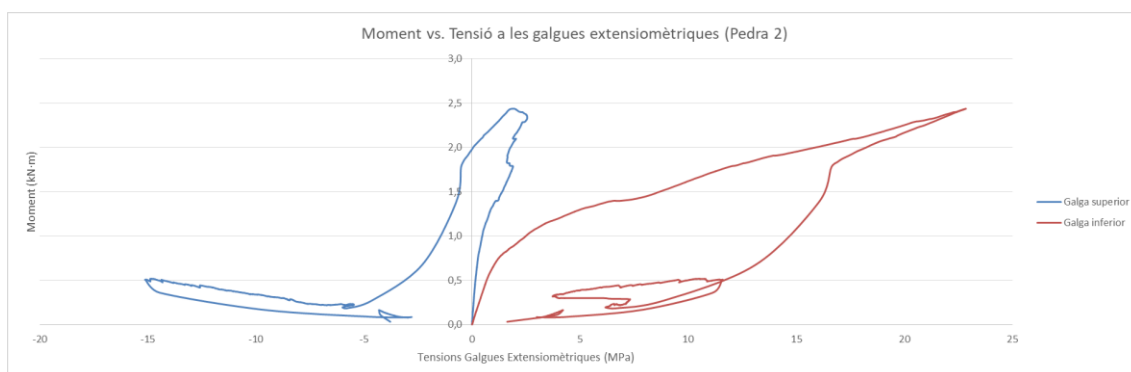
Amb el que si es caracteritzen en similitud de comportament mecànic es en el post-trencament i la falla CFRP, ja que la força de l'actuador cau en picat fins aproximadament 1kN (en el cas de Pedra 1, el valor es més baix però es recupera lleugerament fins 1kN) fins al punt de desplaçament màxim que arriba l'actuador i marca el final de l'assaig degut a que hi ha hagut un trencament per fatiga de l'única part de l'estructura que quedava treballant, el bloc de formigó. El desplaçament màxim de l'actuador abans d'aquest trencament i la posterior retirada de l'actuador ha estat de 34,45 mm per Pedra 1 i de 40,83 per Pedra 2.



Gràfica 4. Moment vs. tensions (Pedra 1)

Un altre dels valors estudiats han estat les tensions en els extrems superior i inferior del CFRP on hi hem col·locat les galgues extensiomètriques que durant l'execució de l'assaig ens han anat mesurant les microdeformacions tant a la cresta com a la vall del reforçament extern. Com es pot observar, s'han graficat els valors de les tensions de les galgues obtinguts a partir de les deformacions calculades experimentalment i el mòdul elàstic del CFRP (45000MPa).

En aquesta primera gràfica corresponent a el prototip Pedra 1 es pot observar que els valors de tensió més elevats son els obtinguts quan el moment es màxim i per tant pertanyen al punt del trencament del CFRP. El comportament dels valors obtinguts per les dues galgues era l'esperat amb la sorpresa ja comentada de la superació en gran mesura dels valors de resistència obtinguts. La galga inferior treballa íntegrament a tracció arribant a un valor de tensió màxim de 80,94 MPa, mentre que la galga superior situada a la cresta del CFRP passa de treballar a compressió quan el formigó ja ha relliscat i produint-se amb anterioritat el despeniment i trencament de la capa de CFRP, encara que es destaca el seu prolongat comportament a tracció tot i el trencament de la fibra comentat anteriorment.



Gràfica 5. Moment vs. tensions (Pedra 2)

En la gràfica del moment front les tensions a les galgues del CFRP per al espècimen Pedra 2, observem que el comportament enregistrat per la galga inferior segueix sent purament a tracció arribant a un valor de tensió en proporció al valor de moment màxim

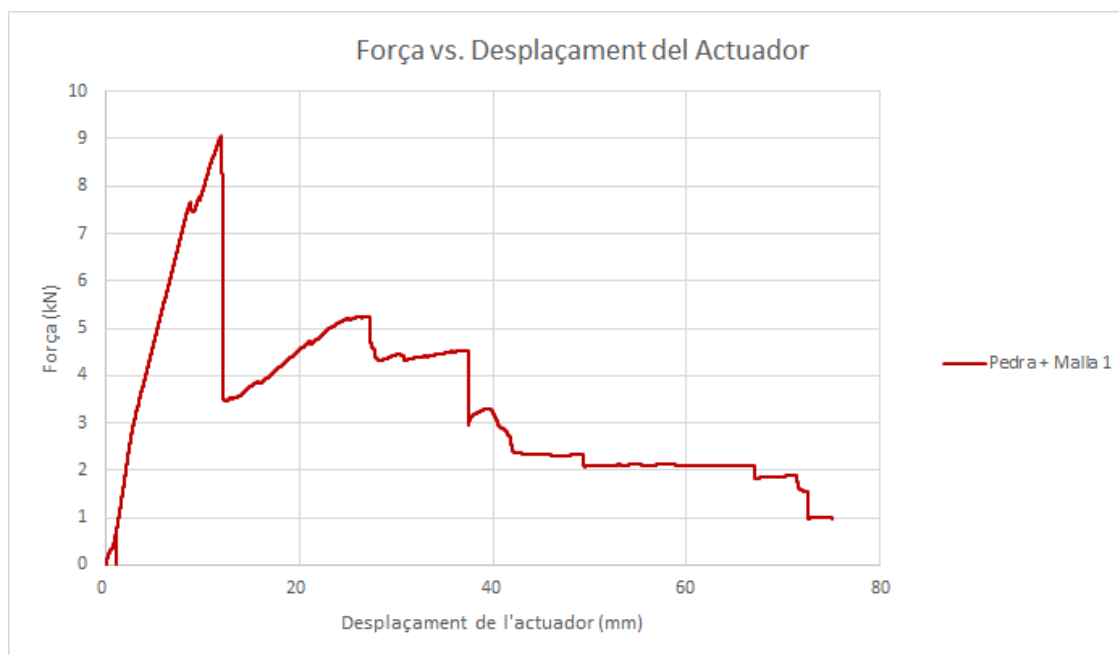
aconseguit al trencament de 22,83 MPa. Per contra, observem que el registre de màxims aconseguits per la galga superior es per tensions aconseguides a compressió del valor de -15,13 MPa. La representació en la gràfica en l'entorn negatiu pertany a les seccions que treballen a compressió, ja que les lectures de microdeformacions llegides per les galgues venen donades en valors positius per a deformacions a tracció.

5.3.2 Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Malla

Pedra + Malla 1

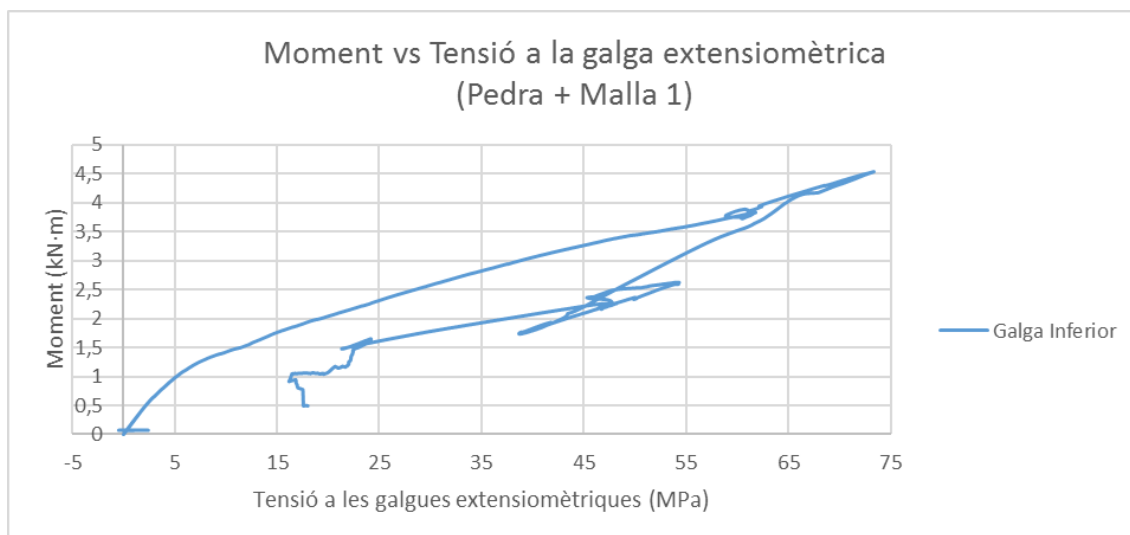
El següents espècimens en assajar han estat els que ja s'ha incorporat la malla com a reforçament estructural i nexa d'unió entre el CFRP i el formigó. Cal destacar que amb el cas de Pedra + Malla 1 se'ns ha subministrat les dades analítiques d'un mateix assaig de flexió per un prototip construït i testat anteriorment al laboratori. Les dades obtingudes s'ha decidit tractar-les en gràfiques diferents ja que la caracterització dels resultats va ser diferent en el primer assaig a flexió per el prototip Pedra + malla 1. Per exemple, l'actuador va arribar a un desplaçament màxim de 75 mm degut a un trencament prematur del formigó abans d'arribar als 100 mm de recorregut que es el valor fins al que estem analitzant les nostres bigues. Per altra banda en el primer prototip només es va col·locar una sola galga extensiomètrica situada a la part inferior, per tant només tindrem un sol valor de lectures de tensió per l'extrem de la vall del CFRP.

Per tant es procedeix a l'anàlisi de resultats experimentals separatament per aquest apartat, començant pel prototip Pedra + malla 1.



Gràfica 6. Força vs. desplaçament (Pedra + Malla 1)

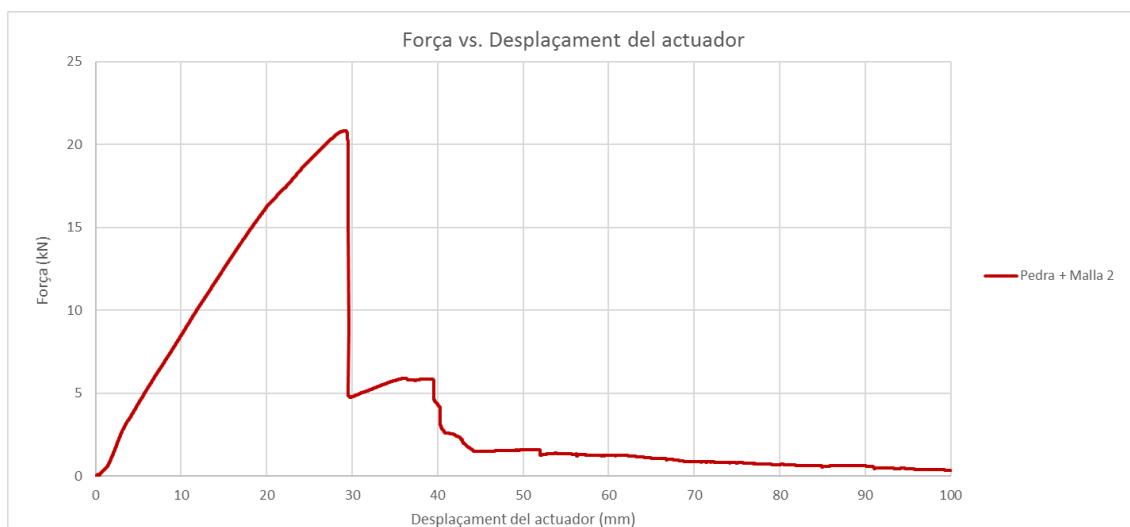
Aquest primer prototip amb introducció de malla a la seva construcció ens ha donat un valor de força màxima a 9,07 kN a 12,03 mm de desplaçament de l'actuador. S'observa un segon i fins i tot un tercer punt de falla de treball del CFRP. Posteriorment a aquesta tercera falla i aproximadament a un desplaçament a partir de 40 mm per part de l'actuador, el CFRP és l'únic que resta treballant amb la seva cresta aixafada, fins arribar als 75,12 mm on hi ha hagut una ruptura del bloc de formigó i s'ha aturat l'assaig.



Gràfica 7. Moment vs. tensions (Pedra + Malla 1)

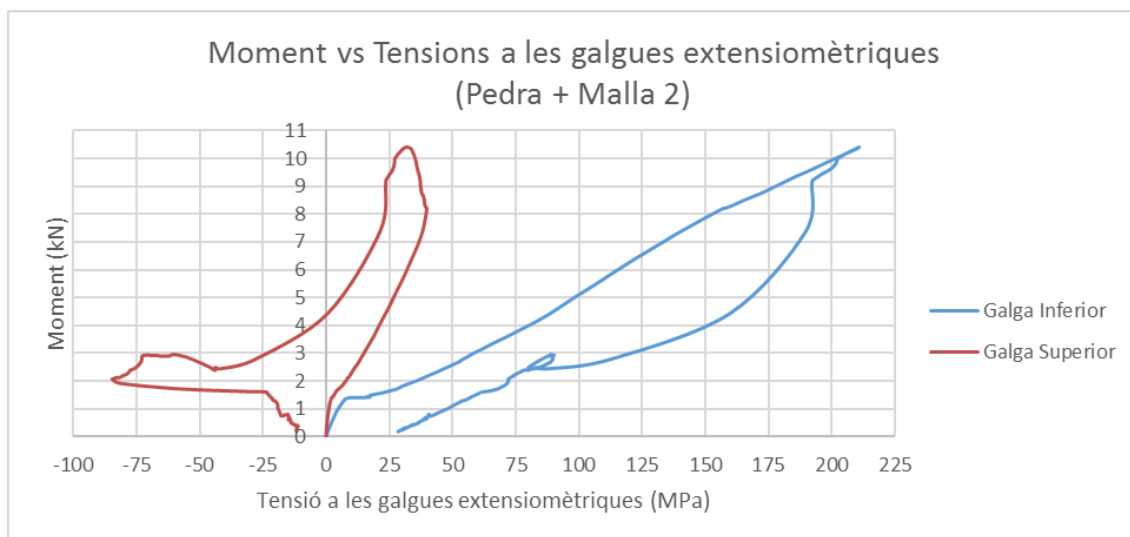
Com s'ha comentat, en les dades donades per aquest assaig només podem representar els valors de tensió de la galga extensiomètrica situada a la vall del CFRP. El valor màxim de tensió a tracció ha estat de 73,45 MPa obtingut en la primera fallada estructural per un moment sobre la biga de 4,5 kN·m.

Pedra + Malla 2



Gràfica 8. Força vs. desplaçament (Pedra + Malla 2)

En el segon prototip de Pedra + Malla el qual si s'ha assajat fabricat i testat en aquest estudi experimental, els valors per tensió i moments màxims han estat força elevats. La força màxima ha estat aplicada just en el moment de fallada del CFRP i ha estat de 20,82 kN per una distància recorreguda per l'actuador de 29,19 mm. Amb aquests resultats comença a valorar positivament l'ús de la malla per una major resistència a moment flector tal i com havíem plantejat en els nostres objectius.

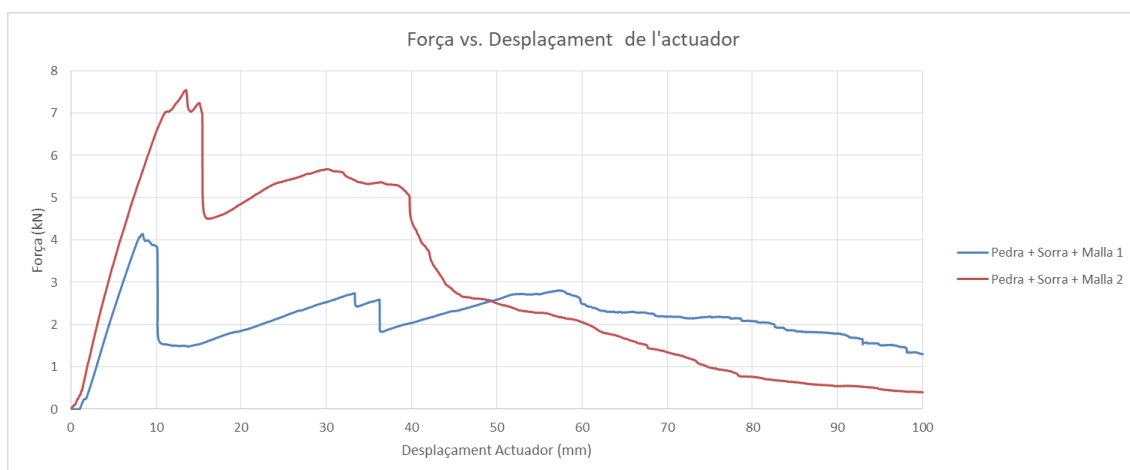


Gràfica 9. Moment vs. tensions (Pedra + Malla 2)

Els valors obtinguts de tensions per compressió i tracció d'ambdues galgues ha estat molt elevat en coherència als alts valors de tensió aconseguits en aquesta proveta. La tensió a tracció màxima ha estat de 213 MPa aconseguits al moment de ruptura a l'extrem inferior del CFRP. La galga superior ha mostrat un comportament homogeni de l'estructura arribant instants previs de la ruptura a valors de tensió a tracció de 38 MPa. Després de la falla del CFRP, ha passat a treballar a compressió per valors màxims de -83 MPa.

5.3.3 Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Sorra + Malla.

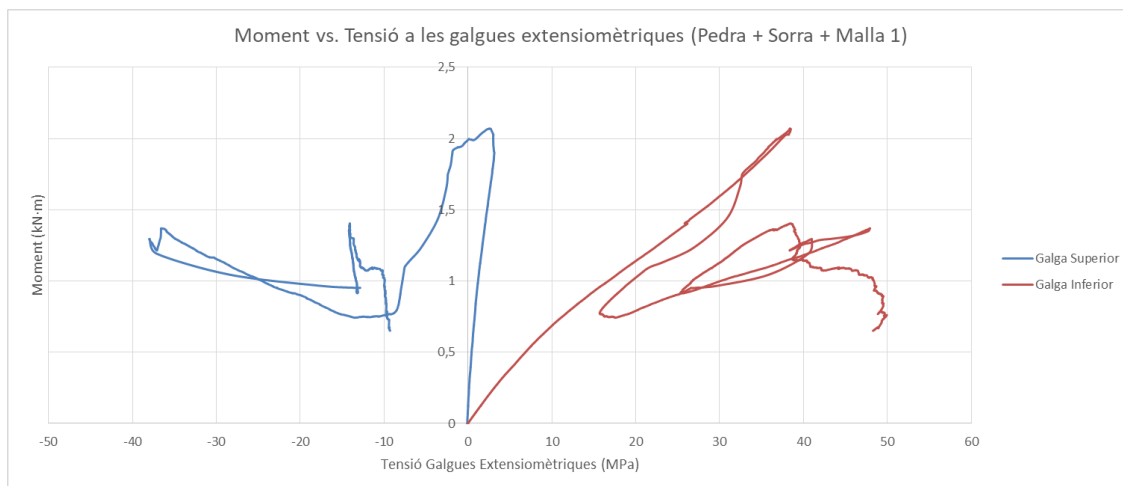
Seguidament els prototips a analitzar han estat els que han incorporat a la seva construcció la sorra com nexa d'unió entre el CFRP i el formigó.



Gràfica 10. Força vs. desplaçament (Pedra + Sorra + Malla)

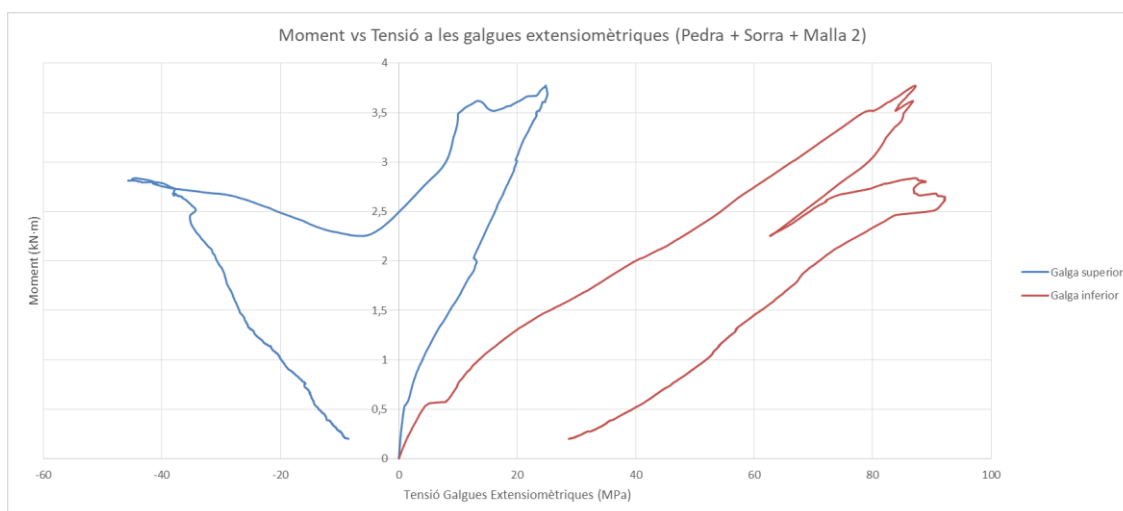
Els valors màxims obtinguts per les gràfiques de força i moment front desplaçament han estat de 8,42 mm de desplaçament de l'actuador a una força aplicada de 4,14 kN pel prototip Pedra + sorra + malla 1. Pel segon prototip del tipus Pedra + sorra + malla s'han obtingut uns valors de força 7,47 kN amb un desplaçament aplicat de l'actuador de 13,54 mm. Després del punt de trencament s'ha observat pel primer prototip que l'aplicació de força no ha caigut en picat sinó que s'ha mantingut a la meitat de la força

màxima aconseguida, inclús ha augmentat lleugerament fins arribar a una segona falla. El comportament d'ambdós espècimens després del punt de ruptura es força similar, del que es pot deduir que la malla desenvolupa un paper important en el comportament estructural després del lliscament del CFRP per falla. També observem que per al moment no podem defensar la suposició de que la sorra faci de bon nexse connector entre el CFRP i el formigó, el resultats obtinguts es situen per sota dels valors màxims obtinguts pels assajos de Pedra + Malla.



Gràfica 11. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 1)

Pel que fa la gràfica de Tensions a les galgues respecte al moment al Primer prototip, tornem a observar un comportament d'esforç en forma de compressió pel que a la part superior del CFRP, obtenint un valor màxim de tensió a -38,02 MPa obtingut després de la ruptura del CFRP i treballant en aquesta segona fase comentada anteriorment on la càrrega ha augmentat lleugerament, obtenint un segon crack sobre la fibra. Els valors de tensió per la galga situada a l'extrem inferior torna a ser purament a tracció, obtenint una tensió al punt de ruptura de 38,73 MPa, però aconseguint un valor màxim de 49,94 MPa molt aprop del que em considerat el desplaçament límit del actuador per aquests assajos. Això indica que el formigó resistia encara a compressió tot i el despeniment del CFRP.



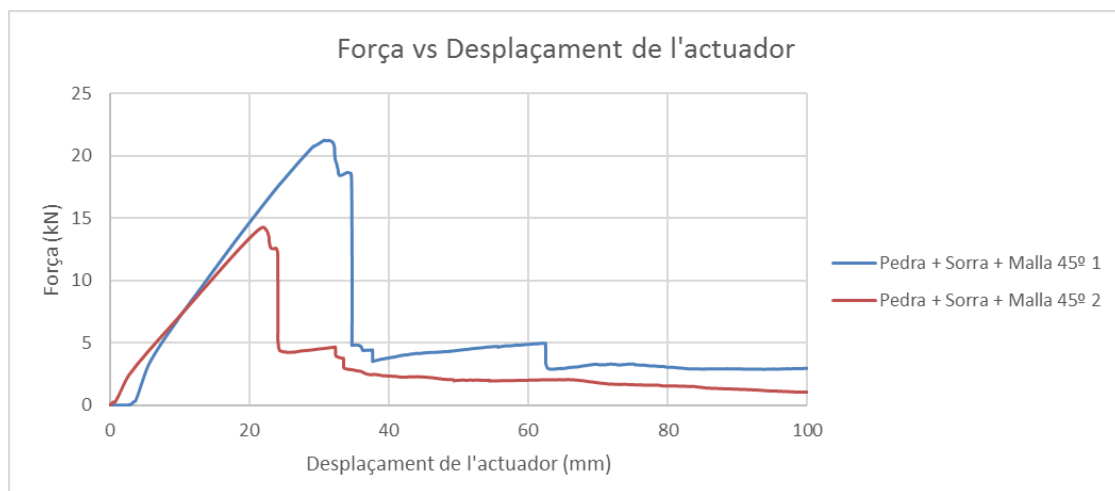
Gràfica 12. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 2)

En el cas de l'espècimen Pedra + sorra + malla 2 trobem que la galga inferior marca un valor màxim de tensió per tracció a 92,25 MPa seguint el patró de comportament mecànic comentat en l'anterior gràfica, on s'identifica un segon i definitiu trencament del

CFRP. Pel que fa el comportament de la cresta del CFRP a l'estructura, resisteix a tracció per valors de 25,11 MPa fins al punt de trencament de la fibra, i passa a comportar-se completament a compressió per valors de -45,72 MPa obtinguts en la segona falla. El comportament de l'estructura a partir d'aquesta segona falla es de fatiga, on només treballa el formigó però amb una disminució continuada de tensions per deformació com de càrrega d'actuador.

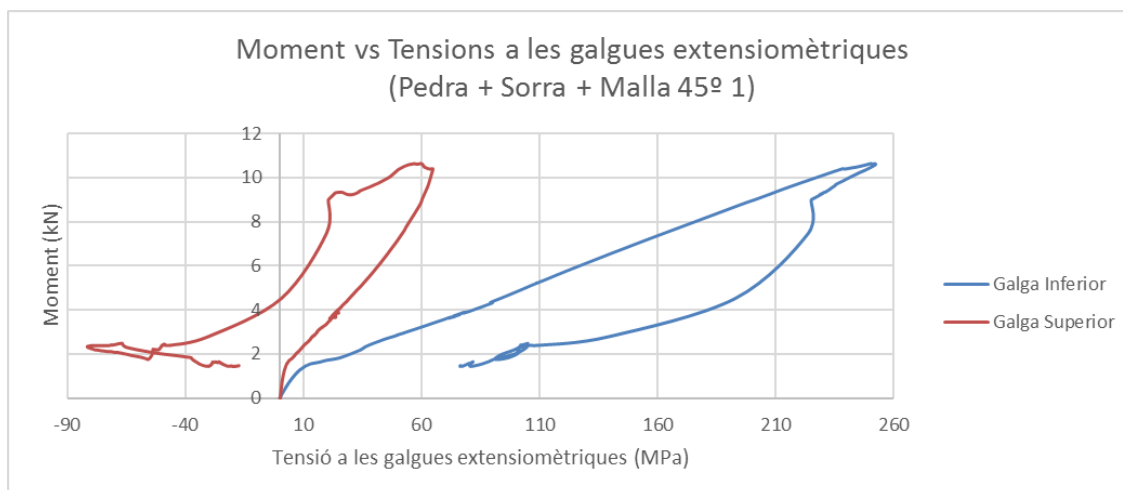
5.3.4 Cas de Formigó + CFRP + Pedra + Sorra + Malla inclinada a 45°

Per últim es passen a analitzar els resultats experimentals obtinguts pels últims prototips elaborats, la diferencia dels quals ha estat la col·locació de la malla en la unió del CFRP amb el formigó, trencant així el patró de repartició d'esforços que fins ara seguien els eixos longitudinals i transversals originals segons la geometria de la biga.



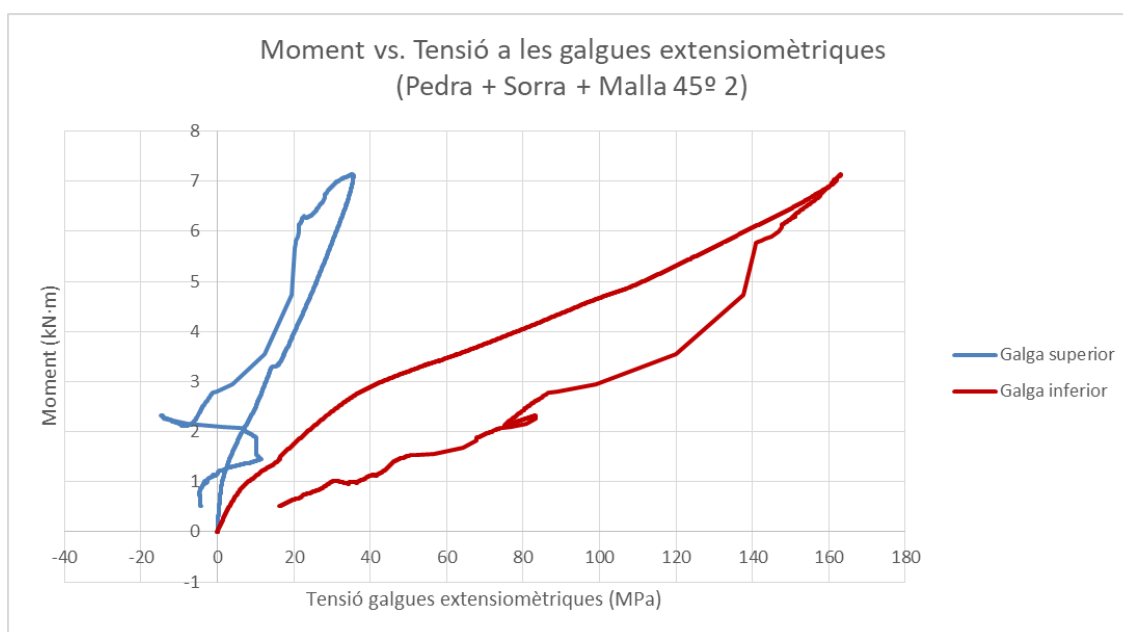
Gràfica 13. Força vs. desplaçament (Pedra + Sorra + Malla 45°)

Els valors obtinguts pel prototip 1 amb malla inclinada ha estat el record aconseguit d'entre tots els espècimens testats. Ha aconseguit suportar un màxim de 21,27 kN a una distancia recorreguda per l'actuador de 30,81 mm. Per altra banda, el segon prototip assajat no ha aconseguit valors tan favorables de resistència a flexió i ha trencat la seva homogeneïtat estructural als 14,28 kN aplicats per l'actuador, havent-se desplaçat aquest mateix uns 22 mm. S'observa una segona falla per part del CFRP amb una caiguda de càrrega de l'actuador d'uns 3-4 kN per ambdós casos. Posteriorment d'aquesta segona falla disminueixen linealment els valors de càrrega per deixar pas el treball a fatiga de compressió per part del formigó.



Gràfica 14. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 45° 1)

Es repeteixen els mateixos patrons de registre de tensions a la cresta i a la vall del CFRP. La part superior augmenta el seu esforç a tracció fins al moment del primer trencament, per donar pas a un treball purament compressiu quan la estructura ja no treballa conjuntament, obtenint el seu màxim a -81,12 MPa. L'augment de les tensions a tracció per part de les deformacions a la galga inferior es linealment progressiva respecte a l'augment de càrrega, donant una tensió màxima de 252,3 MPa al punt de ruptura. Aquestes elevades tensions es consideren proporcionals a l'alt nivell de càrrega aconseguit a l'assaig i es valoren molt positivament aquest dos resultats.



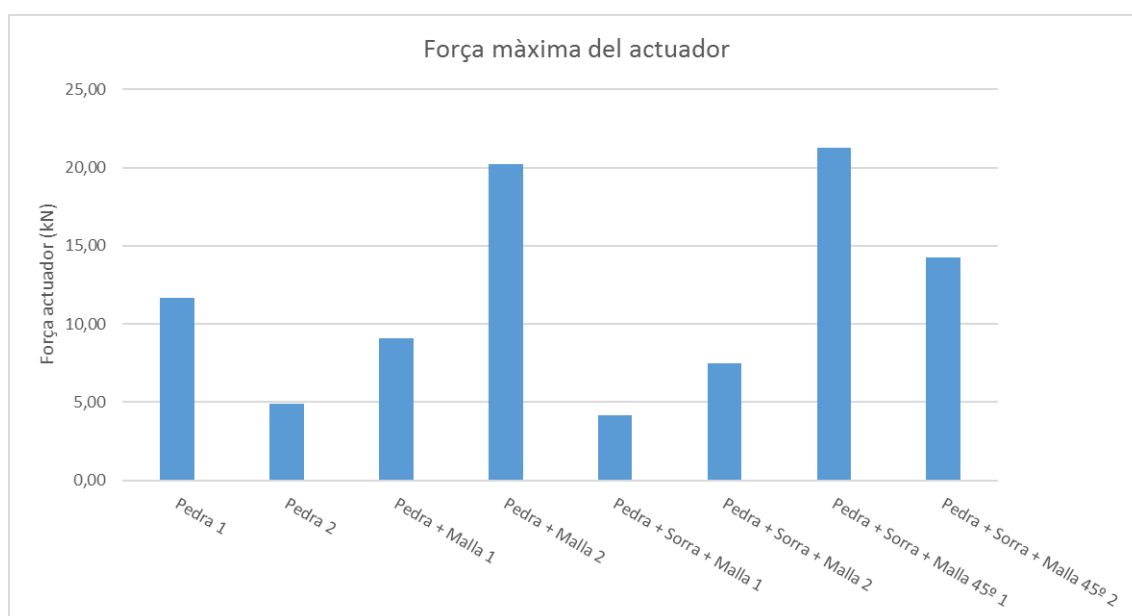
Gràfica 15. Moment vs. tensions (Pedra + Sorra + Malla 45° 2)

En el cas del segon espècimen amb malla a 45°, els valors obtinguts per la galga superior indiquen que la cresta del CFRP per aquest cas ha treballat en major part a tracció contràriament a la resta de resultats obtinguts en els altres casos. El seu valor màxim a compressió es de -14,89 MPa mentre que la tensió a tracció en el punt de trencament ha estat de 35,76 MPa. La galga inferior treballa completament a tracció obtenint un valor màxim de 163,69 MPa. Aquest resultats son força positius ja que

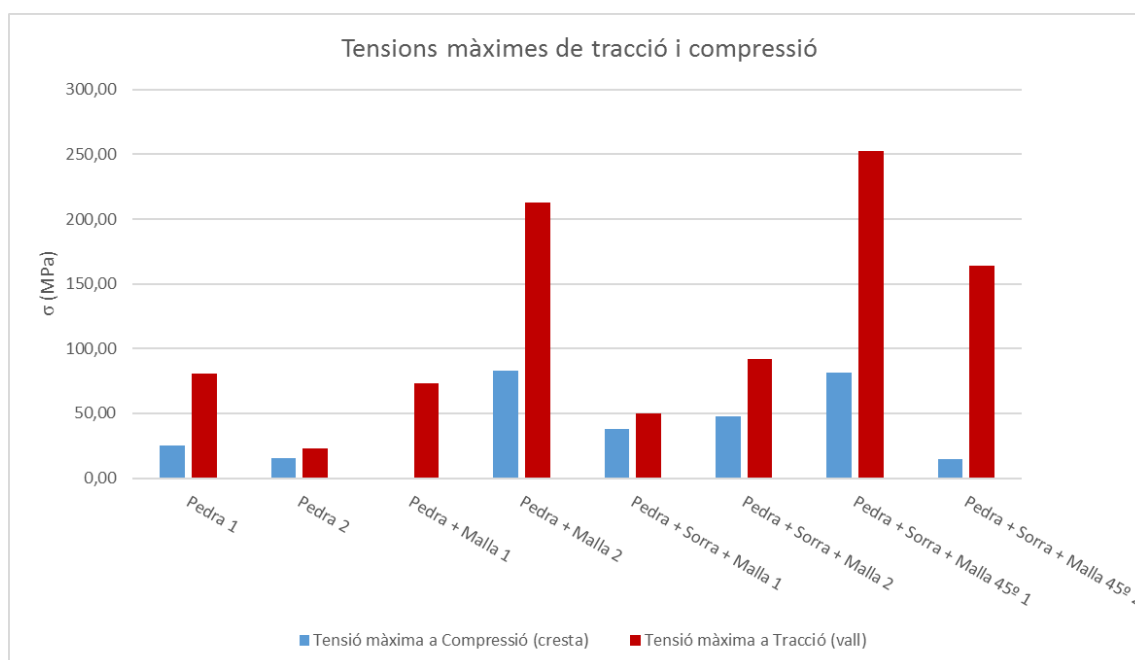
indiquen una bona homogeneïtzació estructural i un treball conjunt eficaç, sense efecte *Buckling* (explicació a l'Annexa 1) tan exagerat com en els altres casos.

5.4 Conclusions dels resultats experimentals

Un cop obtinguts i discutits tots els valors experimentals en cada un dels prototips, es passa a representar conjuntament els valors de força màxima i tensions màximes de tracció i compressió de tots els espècimens assajats. Els punts de tracció i compressió màxims han coincidit gairebé en la totalitat dels casos amb els punts de màxima aplicació de càrrega per part de l'actuador, es a dir, en els punt de falla estructural del CFRP + Formigó. Per aquest motiu s'ha volgut facilitar la visualització d'aquest tres valors més significatius obtinguts en aquesta experimentació i que a més estan correlacionats entre ells, i així extreure'n les conclusions experimentals pertinents.



Gràfica 16. Tensions màximes conseguides pels prototips.



Gràfica 17. Tensions màximes de tracció i compressió.

Com bé s'observa en les dues gràfiques, amb els prototips amb els que s'obté una càrrega per part de l'actuador més elevada son capaços de suportar unes tensions a tracció i compressió molt més altes com ja s'esperava, ja que aquestes dues propietats mecàniques treballen proporcionalment.

Uns dels valors que criden l'atenció son els obtinguts per els prototips conformats a base Pedra+ Sorra + malla ja que les xifres de força i tensions màximes s'assimilen molt més als valors obtinguts pels prototips fabricats sense malla. La diferencia més destacable entre aquests dos ha estat que els prototips amb malla recte sorra i pedres treballen molt millor a compressió, i això verifica la funcionalitat de la malla en el punt més desfavorable de l'assaig, on la fatiga mecànica dels primers prototips sense malla a portar a la falla total del bloc de formigó, mentre que pels prototips amb malla aquest bloc separat del CFRP un cop lliscat ha pogut seguir treballant (ja totalment esgotat i esquerdat).

Per altra banda, es pot concloure que la sorra no es considera un nexa connector molt eficaç per aquest tipus d'estructures mixtes. Els valors obtinguts per el prototips que inclouen sorra a la seva construcció no aporten una diferenciació molt clara entre els que no en porten.

Experimentalment, els millors resultats obtinguts mecànicament parlant han estat els corresponents als últims dos prototips conformats: Pedra + sorra + malla inclinada a 45°. Es destaca la elevada força resistida durant l'assaig així també com el comportament a tracció en relació al de compressió. S'aprecia una diferencia de treball notable en el punt de trencament que em trobat que a la vegada es el punt més desfavorable. Els baixos nivells de deformacions per compressió indiquen que l'estructura aguanta molt bé treballant homogeniament parlant, ja que si els valors de compressió fossin molt més exagerats es produiria el conegut efecte *buckling*, on la falla del treball conjunt de la biga es total i el CFRP es desprèn del formigó.

En conclusió, podem defensar amb els valors obtinguts que els millors resultats de resistència a flexió els donen les bigues amb una construcció de pedres i mallat, tot i

que no es pot determinar amb total certesa i amb els paràmetres obtinguts quina configuració de malla segueix sent la més adient, si la recte o la inclinada. Es necessitarien mes assajos i un estudi d'altres propietats mecàniques per acabar de confirmar-ho.

Experimentalment s'ha comprovat que la configuració de malla inclinada aporta un millor comportament, però també es destaca que els resultat del procés constructiu han anat millorant conforme anàvem elaborant més provetes, pel que la qualitat de construcció de les provetes finals es considera superior a les provetes inicials gràcies a l'experiència guanyada en el procés de construcció.

6 Pressupost

A aquest apartat s'ha estimat els costos que requeriria un estudi d'aquesta magnitud. La inversió per a la realització d'aquest treball ha estat facilitada pel Departament de Resistència de Materials i Estructures i pel Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM).

El cost total calculat és de **11.766 €**.

Per veure amb més detall aquest apartat, dirigeixi's al document "Pressupost" adjunt a aquest treball.

7 Impacte mediambiental

Com es diu a l'abast del treball, no està inclòs el procediment detallat de tractament de residus. Però en aquest estudi s'ha fe us de productes químics els quals posseeixen una normativa la qual obliga a identificar els riscos de treballar amb aquestes substàncies. L'única substància treballada amb aquestes característiques ha estat la resina d'epoxi, per tant a continuació es mostren les indicacions de perillositat del producte que hem utilitzat com a matriu per elaborar el reforç laminat de CFRP.

- Resina d'Epoxi.

Es mostra una taula on es recullen els Pictogrames de perillositat d'aquesta substància i el seu significat.



	Comburent: són productes rics en oxigen que en contacte amb altres substàncies, sobretot inflamables, poden provocar, avivar o agreujar un incendi o una explosió.
	Corrosiu: el producte pot atacar o destruir metalls i causar danys irreversibles a la pell, ulls o altres teixits vius, en cas de contacte o projecció.

Tabla 10. Pictogrames de perillositat de la resina d'epoxi.

Val a dir que en tot moment per la manipulació i execució de tasques en el Laboratori, s'han seguit els protocols de d'Equipament de protecció individual (EPI) que han constatat de les següents elements:

- Ulleres de seguretat
- Bata de laboratori
- Mascareta

La resta de residus contaminants apart de la resina d'epoxi han estat les restes de formigó que han estat adequadament tractats pels tècnics de laboratori del LITEM.

El càlcul de les emissions relacionades amb el consum elèctric durant la realització dels assajos s'ha fet segons el Factor de emissió associat a la energia elèctrica: el mix elèctric de la generalitat de Catalunya. Segons aquest estudi l'energia consumida de forma elèctrica a la península (al 2016) tenint en compte que provenen de diferents tipus de centrals s'associa a unes emissions de 308 g CO₂/kWh.[13]

La totalitat d'hores ha estat 8, tenint en compte una mitjana de 1 hora des de la preparació previa de l'assaig, posta a en marxa de l'actuador, dels PC's i de tota la instrumentació i equipament necessària per a la realització del 8 assajos de flexió. A continuació es desglossa en la següent taula la quantitat de kW consumits per l'equipament del banc de proves.

Equip	Consum (kW)	Temps utilització (h)	kWh
Actuador	6	8	48
Ordinadors (2)	0,8	8	6,4
Monitor	0,6	8	4,8
Reste de l'equipament	0,4	8	3,2
		TOTAL	62,4 kWh

Tabla 11. Consum elèctric al laboratori

De manera que les emissions associades al consum elèctric en la realització dels assajos realitzats son:

$$62,4 \text{ kWh} \cdot \frac{308 \text{ g CO}_2}{\text{kWh}} = 19.219,2 \text{ g CO}_2 = 19,219 \text{ kg CO}_2$$

Les emissions associades al consum elèctric durant la realització de l'estudi son de 19,219 kg de CO₂.

Com bona part dels nostres prototips s'han realitzat amb una base de formigó, també s'han realitzat els càlculs per trobar els kg de CO₂ associats a la quantitat de m³ de formigó que s'han elaborat i l'impacte ambiental que ha representat la producció i distribució d'aquesta quantitat de material. Per fer aquest càlcul ens basarem en la metodologia del protocol GHG per càlculs d'emissions de gasos d'efecte hivernacle en la construcció. [14]

Amb aquest protocol classifiquem les emissions provinents del formigó utilitzat com emissions d'abast 3: Emissions indirectes derivades de la fabricació de materials, transport de materials i producció i distribució de combustible.

Segons la metodologia de càlcul d'aquest protocol i l'abast de les emissions, s'ha multiplicat la quantitat de formigó usat per la fabricació dels prototips pel seu factor d'emissió. El factor d'emissió donat per aquest protocol per a la seva fabricació es de 310,787 kg CO₂ eq/m³ segons la base de dades HueCO₂.

La quantitat de formigó utilitzat per cada prototip construït en aquest estudi ha estat de 0,06 m³, els quals multipliquem pel nombre d'unitats produïdes i ens dona un total de 0,48 m³ de formigó utilitzat

De manera que les emissions associades a la producció del formigó utilitzat en la construcció dels nostres prototips son:

$$0,48 \text{ m}^3 \cdot \frac{310,787 \text{ kg CO}_2}{\text{m}^3} = 149,177 \text{ kg CO}_2$$

Per tant, el total d'emissions en kg de CO₂ durant l'exercici d'aquest projecte, ja sigui en fase constructiva com en fase experimental durant els assajos, queda recollit en la següent taula:

Activitat	Emissions (kg CO ₂)
Consum elèctric equipament LITEM	19,219
Fabricació formigó	149,177
TOTAL	168,396 kg CO₂

Tabla 12. Total kg CO₂ emesos durant l'exercici

El total d'emissions de CO₂ associades les activitats adherides a aquest estudi experimental sumen un total de 168,396 kg CO₂.

8 Conclusions

Les conclusions finals que podem extreure d'aquest estudi experimental son les següents.

- Existeix una viabilitat constructiva amb els materials utilitzats en aquest projecte, però el procés de fabricació ha estat en alguns casos un aspecte important de l'acabat final de producte.

Hem experimentat amb espècimens de diferents configuracions, encara que el procés constructiu fos molt semblant. S'ha observat que tot i a la diversa naturalesa d'aquest materials no ens hem trobat amb masses dificultats a l'hora de cohesionar-los tots en una mateixa estructura. Però si que hem observat que l'acabat final de les provetes podria haver estat de molta més qualitat si des d'un principi s'haguessin aplicat metodologies que hem anat perfeccionant conforme anàvem realitzant els prototips, com per exemple el vibrat del formigó, que ha donat un acabat molt més homogeni a les dues ultimes provetes de Pedra + Sorra + Malla inclinada 45°, d'aquí que poguéssim treure uns resultats notablement alts. A millor qualitat constructiva, més resistència a flexió.

- La sorra no es considera un nexe d'unió efectiu per a la connexió del CFRP amb el formigó.

Comparant els resultats gràfics dels espècimens que només duien pedra coma nexe d'unió amb els que duien pedra i sorra, la funcionalitat d'aquest material no demostra ser suficientment útil com per tenir-lo en consideració en aquest estudi. Es més, en algun casos s'ha demostrat que ha contribuït al lliscament del reforç de CFRP per la part dels recolzaments, i es que un excés d'aquest material també pot arribar a provocar una falta d'adherència entre la superfície laminar de CFRP i el formigó.

- El prototip que millor es comporta a flexió ha estat el que incorpora malla inclinada.

Es tracta d'una conclusió que, atenent-nos a les deduccions tretes referents a la millora del procés de construcció dels prototips conforme anàvem guanyant experiència de treball, es una mica arriscada afirmar-la. Però analíticament parlant podem concloure que la biga Pedra + Sorra + Malla inclinada 45° ha sigut la que millor rendiment mecànic ha obtingut. Apart de suportar la força màxima aplicada per l'actuador, el seu comportament homogeni durant la primera linealitat del assaig fins al final d'aquest ha sigut força bo. Els baixos nivells de deformacions per compressió a la cresta del CFRP, comparant-los amb els dels altres prototips indiquen que l'estructura aguanta molt bé treballant homogeniament. En ningun moment els valors de deformacions marcats per galga superior (compressió) superen als de la galga inferior (tracció), per tant l'estructura treballa en conjuntament en tot moment aconseguint una distribució correcta de càrregues gràcies en bona part a la malla. Per tant, partint de materials pròpiament fràgils, s'ha aconseguit un conjunt estructural dúctil.

- En els càlculs analítics, no s'ha obtingut una bona correlació de resultats en funció de l'error obtingut en la primera linealitat, però si hi hagut correlació respecte als moments reals i teòrics en el punt de trencament.

Es pot observar com hi ha hagut poca concordança de valors en la anàlisi de resultats per tensions als extrems estructurals en la primera linealitat, on l'error absolut obtingut

respecte als valors teòrics ens ha fet anar a buscar una possible millor coherència analítica en el punt de trencament. Allà em comprovat que la suposició teòrica del cap de compressions rectangular un cop superat els valors màxims de tensió per normativa d'estructures mixtes, ha resultat en una obtenció d'errors molt baixos respecte als valors de moment reals. El que indica que per valors inferiors al 20% és pot considerar una relació acceptable i considerem que l'experimentació compleix amb les suposicions enunciades i per tant totes les bigues han estat fabricades, assajades i analitzades correctament.

9 Bibliografia

En aquest apartat es poden consultar les diferents fonts d'informació utilitzades per la realització d'aquest treball.

- [1] "Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites" (2012) Kopeliovich, Dmitri.
- [2] "Mechanical Behavior of Materials. United States of America" (2000). Courtney, Thomas.
- [3] "La ciencia de las estructuras" (2001). Heyman, Jacques. Instituto Juan de Herrera (Madrid).
- [4] EHE, Instrucción de hormigón estructural.
- [5] "Density of Concrete"(1999). Jones, Katrina The Physics Factbook.
- [6]"Construcción Mixta Hormigón – Acero" (1978). Julio Martínez Calzón y Jesús Ortiz Herrera. Doctores Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- [7] "Estructuras mixtas para edificación según criterios del Eurocódigo 4" (2002), Monfort Leonart, José. UPV.
- [8] ACI (American Concrete Institute). Deflection and stiffness Issues in FRC and thin Structural Elements.
- [9] "Estudio teórico-experimental sobre la reparación y refuerzo de puentes de dovelas con fibras de carbono" (2002). Alarcón, A. ETSICCP, UPC.
- [10] "Cementitious composites reinforced with continuous carbón fibers for strengthening of concrete structures" (2003) *Cement & Concrete Composites* 25. Badanoiu, A., Holmgren, J.
- [11] "Guía de diseño sistema de refuerzo mediante fibra de carbono Replark." (2003) *DRIZORO Construction Products*. Juan Carlos Arroyo Portero.
- [12] "Comportamiento Mecánico del hormigón Reforzado con Fibra de vidrio: Influencia del Porcentatge de fibra Adicionado"(2003) Bravo, J.P. Universidad de Chile.
- [13] Generaitat de Catalunya. Factor de emisión asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico.
- [14] GHG Protocol. World Resources Institute (WRI, World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).
- [15] Delgado, N. (2011). PFC: "Estudio de durabilidad y vida útil de estructuras de hormigón armado. Propuesta para la prevención y reparación".

